

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA REFORZADOS CON BARRAS DE ACERO SOLICITADOS A COMPRESIÓN DE USO EN ESTANTERÍAS

JAVIER ANDRÉS URBANO TOLE

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2017

ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD PORTANTE DE PERFILES DE LÁMINA DELGADA REFORZADOS CON BARRAS DE ACERO SOLICITADOS A COMPRESIÓN DE USO EN ESTANTERÍAS

JAVIER ANDRÉS URBANO TOLE

Tesis de investigación presentada como requisito para optar al título de:

Magister en Ingeniería Mecánica

Director

Profesor MSc. Ing. Ricardo León Parra Arango

Línea de Investigación:
Análisis y Diseño de Estructuras
Grupo de Investigación GIES

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería, Departamento Ingeniería Mecánica y Mecatrónica
Bogotá, Colombia
2017

Dedicatoria

Al Creador, por dejarnos la imaginación para volar y dejarnos la tierra como ancla.

A mi esposa por impulsarme a volar.

A mi hijo, David, por la aventura de la vida.

A mis padres, hermanos y especialmente mis sobrinos por crear un entorno en el reto y la alegría.

Agradecimientos

A la Universidad Nacional de Colombia por permitir en sus personas, espacios y medios la posibilidad de desarrollar esta investigación.

A los profesores del Programa de Ingeniería Mecánica y Mecatrónica e Ingeniería Civil.

Al IC. Ricardo León Parra Arango por su disposición y orientación para llevar a buen puerto esta investigación.

A los jurados, Ing. Edgar Espejo e Ing. Pedro Nel Quiroga, por sus valiosos aportes y comentarios a este trabajo.

Resumen

Los perfiles de lámina delgada con agujeros se utilizan ampliamente en estanterías y su uso tiene cada vez más exigencias por parte del sector logístico. Debido a los costos que representa sustituir las estanterías, es cada vez más frecuente encontrar que, estas se refuerzan en sitio. Una forma de reforzar es mediante barras de acero soldadas, buscando aumentar su capacidad portante. Este trabajo está relacionado con una propuesta para estimar el efecto de este tipo reforzamiento. Dado que este procedimiento no se encuentra contemplado en la normativa, se propone una metodología analítica para la estimación de su capacidad de carga. Se propone un modelo para realizar el ajuste geométrico debido a la inclusión del refuerzo, la presencia de perforaciones y se adaptó el procedimiento de anchos efectivos, adoptado en la norma NSR-10, para la estimación de la capacidad de carga. Por medio de modelos basados en el método de los elementos finitos y el software especializado se realizó un ejercicio de calibración y validación del procedimiento propuesto.

Palabras clave: CFS, Estanterías Metálicas, Perfiles en Lámina delgada a compresión, reforzamiento con barras, FEM, perfiles con agujeros.

Abstract

Thin-wall sections with perforations are widely used in racks and their use has an increasing technical demand in logistics. Due to the costs of replacing racks it is increasingly common to find that these are reinforced on site. One way to reinforce is by joining steel bars, seeking to increase their bearing capacity. This work is related with a proposal to estimate the effect of this type of reinforcement. Since this procedure is not contemplated in regulations, an analytical methodology is proposed to estimate its load capacity. A model is proposed to perform the geometric adjustment due reinforcement inclusion, the presence of perforations and the effective widths procedure, adopted by NSR-10 standard, was adapted for load capacity estimation. By means of models based on the FEM and the specialized software, a calibration and validation exercise of the proposed procedure was carried out.

Keywords: CFS, Steel Racks, Thin-wall section under compression, steel bar reinforcement, FEM, perforated sections.

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Motivación	1
1.2	Justificación	2
1.3	Estado del arte	3
1.3.1	Consulta bibliográfica	4
1.3.2	Descripción general del estado del arte relacionado	6
1.4	Objetivos	8
1.4.1	General	8
1.4.2	Específicos	8
1.4.3	Alcance y limitaciones de la investigación	9
1.4.4	Metodología	9
1.5	Estructura del documento	9
2	MARCO TEÓRICO	13
2.1	Estanterías	13
2.2	Elemento Columna	15
2.2.1	Tipos de sección	16
2.3	Tipos de refuerzo para perfiles de estantería	17
2.3.1	Comportamiento de barras de refuerzo a compresión	19
2.3.2	Conexión entre perfil y refuerzo	21
2.4	Materiales de columnas y procesos de fabricación	22
2.4.1	Materiales	22
2.4.2	Proceso de doblado	22
2.4.3	Proceso de punzonado	27
2.4.4	Industria en Colombia	27
2.5	Análisis de perfiles de lámina delgada	28
2.6	Diseño de perfiles de lámina delgada	29
2.6.1	Aportes relevantes	29
2.6.2	Cálculo de anchos efectivos	32
2.6.3	Ancho efectivo debido a las perforaciones	34
2.6.4	Proceso iterativo para el diseño de la sección	38
2.6.5	Desplazamiento del eje neutro	41
3	MODELOS PROPUESTOS PARA LA CONSIDERACIÓN DEL REFUERZO	43
3.1	Efecto del refuerzo con barras	43
3.2	Modificación del esfuerzo de fluencia de los dobleces	45
3.3	Distribución del área del refuerzo en todos los elementos del perfil	46
3.4	Distribución del área del refuerzo en los elementos adyacentes	48
3.5	Concentración del área del refuerzo en el doblez	50
3.6	Selección del modelo geométrico	52

3.7	¿Por qué se puede tomar el elemento esquina como rígido y es válida la teoría de lámina delgada?.....	53
4	MÉTODO PROPUESTO PARA LA ESTIMACIÓN DE CARGA	55
4.1	Filosofía de diseño a la luz de la normativa existente NSR-10. Modelo de referencia	55
4.2	Ajuste del modelo que considera las perforaciones en los elementos del perfil	58
4.3	Efecto del refuerzo y perforaciones en perfil tipo C	61
5	VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PROPUESTO.....	65
5.1	Plan de validación y aplicación	65
5.2	Características de los Modelos de validación	67
5.3	Casos de Validación	69
5.3.1	Caso 1: Ángulo con labios en las aletas	70
5.3.2	Caso 2: Perfil C con labios en las aletas	72
5.3.3	Caso 3: Perfil C con labios en las aletas y perforaciones en el alma	76
5.4	Casos de aplicación a perfiles reforzados externamente sin y con perforaciones	78
5.4.1	Caso 4: Angulo con labios en las aletas y reforzado con barras	78
5.4.2	Caso 5: Perfil C con labios en las aletas y refuerzo con barras.....	80
5.4.3	Caso 6: Perfil C con labios en aletas, perforaciones en alma y refuerzo con barras de acero	82
5.5	Análisis y discusión	84
5.5.1	Análisis y discusión de la desviación de los resultados	85
6	CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO	89
6.1	Conclusiones.....	89
6.2	Recomendaciones	91
6.3	Trabajos Futuros	91
7	BIBLIOGRAFÍA.....	93
8	ANEXO A: Cargas en estanterías	103
8.1	Combinaciones de cargas	103
8.2	Aproximación a la solicitación de carga en un perfil tipo columna	104
9	ANEXO B: ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGAS MEDIANTE MEF ..	105
9.1	Método de Elementos Finitos	105
9.2	Modelado de los perfiles y el refuerzo	106
9.3	Mallado y tipo de elementos usados	107
9.4	Condiciones de contorno y cargas	108
9.5	Introducciones de las propiedades no lineales del material.....	109
9.6	Análisis lineal.....	112
9.7	Imperfecciones	113
9.8	Análisis No Lineal	114
10	ANEXO C: Herramientas Desarrolladas.....	117
10.1	MATLAB. Herramienta para calcular las propiedades de un perfil e incluir la geometría de las barras.....	117
10.2	EXCEL	120
10.2.1	Hoja de cálculo para estimar la capacidad de carga en perfiles tipo C con labios, con y sin refuerzo con barras, con y sin agujeros.	120

10.2.2 Hoja de Cálculo para Estimar la capacidad De carga en perfiles tipo L con labios, con y sin refuerzo con barras.	123
--	-----

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1-1: Perfil C de estantería sin refuerzo y con refuerzo. Fte. Autor.....	1
Figura 1-2: Mapa general de la ubicación de la investigación en contexto científico, Fte. Autor	4
Figura 2-1: Estantería tipo selectivo o simplex. Fte. Autor.	13
Figura 2-2: Partes de una estantería. Fte. Autor.....	14
Figura 2-3: Partes de un marco de carga. Fte autor.....	15
Figura 2-4: Diferentes tipos de perforaciones longitudinales para permitir el fácil intercambio de posición de vigas en las columnas [71].....	16
Figura 2-5: Algunos tipos de secciones columnas de marcos de carga usados en estanterías y refuerzos utilizando los mismos perfiles [73].	17
Figura 2-6: Perfil lámina delgada reforzado con CFRP [75].	17
Figura 2-7: Algunos tipos de secciones reforzadas para columnas de marcos de carga usados en estanterías: a) Combinaciones de perfiles básicos [73], b) ejemplo de perfil reforzado [76].	18
Figura 2-8: Refuerzo con barras de secciones de lámina delgada usados en formaletas. Fte autor.....	18
Figura 2-9: Planteamiento del problema de la resistencia a la compresión de barras de refuerzo en columnas de concreto reforzado, con barras expuestas [77]	19
Figura 2-10: Soldadura tipo que se utilizaría para la conexión entre la barra y la sección de lámina delgada [77].	21
Figura 2-11: Configuración típica de un doblado en una prensa dobladora en una matriz con abertura vertical [85].	23
Figura 2-12: Representación de las fuerzas que actúan en el efecto de recuperación elástica [85]	24
Figura 2-13: Configuración típica de un doblado en una prensa dobladora en una matriz con abertura vertical. [85].	25
Figura 2-14: Punzones y matrices comerciales. [85]. Izq. Matriz en V, Punzón Gooseneck. Der. Matriz en V y Punzón de cuerpo delgado.....	25
Figura 2-15: Esquema general de una conformadora por rodillos [85].	26
Figura 2-16: Diagrama de flor para determinar el número de estaciones [85].	26
Figura 2-17: Representación del Proceso de punzonado. 1. Deformación Plástica; 2. Deformación con Cortante 3.Fractura por arrancamiento [85].	27
Figura 2-18: Placa rectangular sometida a compresión [81].	29

Figura 2-19:	Valores de k [81].	30
Figura 2-20:	Placa de desarrollo de teoría de Von Karman [81][4]. a) Carga distribuida menor que carga elástica crítica. b) Carga mayor a la carga elástica crítica y menor al esfuerzo de fluencia. c) Carga mayor o igual al esfuerzo de fluencia. d) Redistribución teórica para hallar el ancho efectivo.	31
Figura 2-21:	Comparación entre agujeros. a) Agujeros acordes a NSR-10 [42]. b) Agujeros usados en estanterías. Fte. Autor y [93].	36
Figura 2-22:	Esfuerzos normalizados en elemento rigidizado con agujeros de diferentes tamaños y configuraciones [25].	37
Figura 2-23:	Correlación en entre x y η [54].	37
Figura 2-24:	Diagrama de flujo de Diseño Perfil con trabajo en Frío a Compresión (Adaptado por autor de AISI D101-09)[94].	39
Figura 2-25:	Diagrama de flujo del cálculo de área efectiva para un perfil estándar Diseño Perfil con trabajo en Frío a Compresión (Adaptado por autor de AISI D101-09)[94].	40
Figura 2-26:	Movimiento del centroide de una sección sujeta a compresión [96].	41
Figura 2-27:	Evolución del ancho efectivo con el aumento de carga para un perfil C [96].	41
Figura 3-1:	Perfil en C reforzado con barras. Se muestra las barras de refuerzo y las soldaduras.	43
Figura 3-2:	Perfil reforzado con barras. Izquierda: Esquema 3D con representación de soldaduras. Derecha: sección esquemática del perfil con refuerzo.	44
Figura 3-3:	Estimación de la modificación del esfuerzo de fluencia por trabajo en frío debido al refuerzo.	45
Figura 3-4:	Representación de la modificación del espesor uniforme en todo el perfil por la inclusión del refuerzo.	47
Figura 3-5:	Representación de la modificación del espesor en elementos adyacentes a la inclusión del refuerzo. En este caso, los elementos no adyacentes pueden ser o no otros dobleces o elementos planos.	48
Figura 3-6:	Representación del ejemplo de la modificación del espesor en elementos adyacentes a la inclusión del refuerzo. Horizontal: flange, Vertical: alma.	50
Figura 3-7:	Representación de la inclusión del refuerzo por medio de la modificación del doblez y representación como lámina delgada.	50
Figura 3-8:	Representación del ejemplo de la modificación del espesor en la esquina debido a la inclusión del refuerzo, y la conservación del centro de gravedad en la zona del refuerzo.	51
Figura 3-9:	Tipo de elementos en el perfil tipo C, Fte autor.	54
Figura 3-10:	Representación simétrica del elemento esquina del perfil C, Fte autor.	54
Figura 4-1:	Procedimiento para cálculo de una sección sin agujeros y sin refuerzo. Fte. Autor.	55
Figura 4-2:	a) Sustitución del refuerzo, b) Cambio en el número de elementos del perfil y conservación del centroide. Fte. Autor.	57
Figura 4-3:	Procedimiento para cálculo de una sección sin agujeros y con refuerzo. Fte. Autor.	58

Figura 4-4:	Ajuste por la presencia de perforaciones en el elemento. Fte. Autor.	59
Figura 4-5:	Procedimiento para cálculo de una sección con agujeros y sin refuerzo. Fte. Autor.	60
Figura 4-6:	Representación del modelo final de los elementos en un perfil C reforzado con barras y con perforaciones en el alma. Fte. Autor.	61
Figura 4-7:	Procedimiento para cálculo de una sección con agujeros y con refuerzo de barras circulares. Fte. Autor.	62
Figura 5-1:	Montaje estándar para modelamiento de perfiles de lámina delgada a compresión. a) Izquierda, Modelo del autor. b) Derecha, Modelo para ensayo [19]	68
Figura 5-2:	Placas de montaje desarrolladas y con ensayo para futura experimentación. Fte Autor.	68
Figura 5-3:	Deformaciones en el centro de la columna (PL 70x70x1.5).	71
Figura 5-4:	Deformaciones en perfil L: a) Con pandeo local en columnas cortas; b) Con pandeo global y flexo-torsional en columnas largas para ángulos.	71
Figura 5-5:	Deformaciones en el centro de la columna. a) CUSFM. b) ANSYS Fte. Autor.	73
Figura 5-6:	Perfil en C deformado hasta la carga última a compresión. a) Experimental Young [41]. b) Modelo de elementos finitos de Young [41]. c) Modelo en ANSYS. Fte. Autor.	73
Figura 5-7:	Deformaciones en el centro de la columna PC 40x40x5x1.0 x 300 mm. a) CUSFM. b) ANSYS Fte. Autor.	75
Figura 5-8:	Deformaciones en el centro de la columna PC 40x40x5x1.0 x 300 mm. a) Experimental [100] b) CUSFM. b) ANSYS. Fte. Autor.	75
Figura 5-9:	Esfuerzos en columna con perforaciones en al alma PCA 98x52x16x1.2 x 360 mm. ANSYS Fte. Autor.	77
Figura 5-10:	Deformaciones en columna con perforaciones en el alma de un PCA 98x52x16x1.2 x 360 mm. a) Pandeo lineal con ANSYS b) Carga ultima no lineal con ANSYS. c) Sección Carga última no lineal con ANSYS. Fte. Autor.	77
Figura 5-11:	Similitud en forma de pandeo en sección L con labios reforzada y no reforzada para L=1500 mm	78
Figura 5-12:	Modificación en forma de pandeo, para Perfil tipo ángulo con labios.	79
Figura 5-13:	Modelo de elementos finitos del perfil reforzado en C con deformación en rango lineal.	80
Figura 5-14:	Vista general Modelo de elementos finitos del perfil reforzado en C deformado	81
Figura 5-15:	Modelo de elementos finitos del perfil reforzado en C con agujeros y con deformación previa a carga última.	82
Figura 5-16:	Comparación Modelo de elementos finitos del perfil C con y sin agujeros.	83
Figura 5-17:	Afectación del perfil C reforzado en el alma por los agujeros.	83
Figura 5-18:	Comparación resultados Pu-FEM-R/Pu-EXP y Pu-FEM-A/Pu-EXP.	85
Figura 5-19:	Comparación resultados Pu-MAE-R/Pu-EXP y Pu-MAE-A/Pu-EXP.	86
Figura 5-20:	Comparación resultados Pu-MAE-R/Pu-FEM-R y Pu-MAE-A/Pu-FEM-A	86

Figura 5-21:	Comparación relativa del estudio de la desviación de los resultados. MEF Método de los Elementos Finitos, MAE Método de los Anchos Efectivos, -R información tomada de las referencias, -A información obtenida por el Autor.....	87
Figura 9-1:	Esquema general de Estimación de carga en ANSYS. Fte Autor	106
Figura 9-2:	Esquema general de Estimación de carga en ANSYS. Fte Autor	106
Figura 9-3:	Esquema general de módulo de geometría en ANSYS	107
Figura 9-4:	Elemento Shell 181. Y Modelo mallado Fte Ansys Manual-	108
Figura 9-5:	Geometría, probeta y resultado de ensayo.	109
Figura 9-6:	Propuesta de probeta para analizar el aumento en la capacidad de carga en un doblez, evitando aplicar carga fuera del centroide.	110
Figura 9-7:	Ensayo de estimación de cargas iniciales.	111
Figura 9-8:	Análisis de carga Crítica.	112
Figura 9-9:	Geometría de la sección no deformada y deformada por imperfecciones.	113
Figura 9-10:	Método de Newton Raphson.	114
Figura 9-11:	Esquema del proceso en el escritorio de Workbench de ANSYS.	114
Figura 9-12:	Resultados caso 6, Perfil C de altura 80 mm, Aleta 80 mm, labios iguales de 15 mm, espesor de 1,5 mm. Agujeros: Altura 32.40 mm: Ancho 19.05 mm, Separación: 26.5 mm Paso vertical: 51 mm. Sin refuerzo.....	114
Figura 10-1:	Perfiles sin refuerzo seleccionados para realizar adaptaciones geométricas. Izquierda, Perfil C; Centro, Perfil Omega; Derecha, Perfil Omega Rigidizado. Fte. Autor.	117
Figura 10-2:	Perfiles con refuerzo seleccionados para realizar adaptaciones geométricas. Izquierda, Perfil C reforzado; Centro, Perfil Omega reforzado; Derecha, Perfil Omega Reforzado. Fte. Autor.	118
Figura 10-3:	Perfil C sin refuerzo (primera fila) y con refuerzo (segunda fila) representado por la herramienta: Izquierda, Perfil C guía; Centro, Perfil C representado con Modelo de línea Media sin doblez; Derecha, Perfil C representado con Modelo de línea Media con doblez. Fte. Autor.....	118
Figura 10-4:	Perfil C con refuerzo transformado a perfil con solo elementos planos. Izquierda, representado con Modelo de línea Media sin doblez; Derecha, representado con Modelo de línea Media con doblez. Fte. Autor.....	119
Figura 10-5:	Pantalla general de la herramienta Fte. Autor.....	120
Figura 10-6:	Pantalla general de la hoja de Cálculo y correlación con el esquema propuesto. Fte. Autor.	121
Figura 10-7:	Procedimiento para cálculo de una sección con agujeros y con refuerzo de barras circulares. Fte. Autor. (Repetida)	122
Figura 10-8:	Sección en C Nomenclatura en la Hoja de Cálculo. Fte. Autor.	123
Figura 10-9:	Pantalla general de la hoja de Cálculo para perfil L Fte. Autor.....	124

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1-1. Descripción gráfica de los perfiles de interés. Fte Autor.	3
Tabla 1-2. Tabla Resumen Palabras y frases incluidas en la búsqueda.	5
Tabla 1-3. Autores e investigaciones relacionados con estudio de estimación de carga en perfiles conformados en frío. Fte Autor.	7
Tabla 2-1. Materiales usados en perfiles para estanterías en Colombia. Fte [80] adaptado por Autor.	22
Tabla 2-2. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos rigidizados a compresión uniforme. Fte [80] adaptado por Autor.	33
Tabla 2-3. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos no rigidizados a compresión uniforme. Fte [80] adaptado por Autor.	33
Tabla 2-4. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos con una pestaña de borde como rigidizador, tipo aleta. Fte [80] adaptado por Autor.	33
Tabla 2-5. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos con una pestaña de borde como rigidizador, tipo aleta. Fte [80] adaptado por Autor. (Continuación)	34
Tabla 2-6. Requisitos de uso de NSR-10 para agujeros y su comparación con perfiles de uso en estanterías. Fte. [80] adaptado por Autor.	35
Tabla 3-1. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo con Modificación del esfuerzo de fluencia de los dobleces. Fte Autor.	46
Tabla 3-2. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo de distribución del área del refuerzo en todos los elementos del perfil. Fte Autor.	47
Tabla 3-3. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo de Distribución del área del refuerzo en todos los elementos del perfil. Fte Autor.	49
Tabla 3-4. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo de Concentración del área del refuerzo en el doblez. Fte Autor.	51
Tabla 3-5. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo de Concentración del área del refuerzo en el doblez. Fte Autor.	53
Tabla 4-1. Descripción gráfica de los modelos estudiados. Fte Autor.	56
Tabla 5-1. Autores e investigaciones seleccionadas para validación y comparación. Fte Autor.	65
Tabla 5-2. Descripción de las herramientas de validación utilizadas en este trabajo. Fte Autor.	66
Tabla 5-3. Descripción casos de validación y aplicación. Fte Autor.	67

Tabla 5-4. Descripción casos de validación y aplicación para el análisis no lineal. Fte Autor.	69
--	----

Lista de Símbolos y abreviaturas

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término
A	Área
A_e	Área efectiva
A_g	Área transversal bruta
h	Altura nominal del alma del perfil
w	Ancho nominal de la aleta del perfil
l	Longitud nominal del labio
k	Coefficiente de pandeo
L	Longitud del perfil
F_y	Esfuerzo de Fluencia
F_u	Esfuerzo Ultimo
d_b	diámetro barra de acero
s	separación entre apoyos
P_{cr}	Carga crítica de Pandeo
t	Espesor del material
r	Radio de doblez nominal
r_i	Radio interno de doblez
E	Módulo de elasticidad

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término
β_1	Esbeltez del alma del perfil con agujeros
β	Esbeltez de la zona central de la columna con agujeros
η	Parámetro de relación para ancho efectivo en agujeros
θ	Ángulo de inclinación
ρ	factor de reducción
λ	factor de esbeltez

Subíndices







Subíndice	Término
e	efectivo
cr	crítico
ult	último
l	local
d	distorsional
g	global
F	flexionante
FT	flexo-torsional

Superíndices

Superíndice	Término
n	Exponente, potencia

Abreviaturas

Abreviatura	Término
CFS	Cold-Formed Steel
MAE	Método de las Áreas Efectivas
MEF	Método de los Elementos finitos
PultMEF-A	Carga ultima evaluada por el método de Elementos Finitos por el Autor
PultMEF-R	Carga ultima evaluada por método Elementos Finitos por otros referenciados
PultMAE-A	Carga máxima estimada evaluada por método de Anchos efectivos por Autor
PultMAE-R	Carga máxima estimada evaluada por el método de Anchos efectivos por otros referenciados

Sigla	Símbolo	Significado
PL		Sección L, con labios en las aletas
PL-R		Sección L, con labios en las aletas y refuerzo con barras en las esquinas de coincidencia entre las aletas
PC		Sección C, con labios en las aletas
PC-A		Sección C, con labios en las aletas y perforaciones en el alma
PC-R		Sección C, con labios en las aletas y refuerzo con barras en las esquinas de coincidencia entre aleta y alma
PC-A-R		Sección C, con labios en las aletas, perforaciones en el alma y refuerzo con barras en las esquinas de coincidencia entre aleta y alma

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

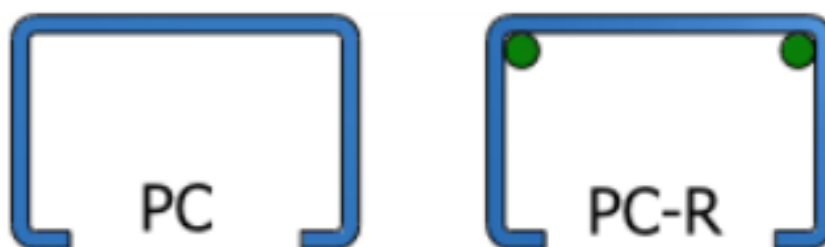
La creciente demanda de espacios de almacenamiento por parte de la industria en Colombia requiere maximizar en volumen y peso la utilización de las áreas que disponen para este fin. Una de las formas más comunes comercialmente, es aumentar en altura los niveles de almacenamiento en una misma área, para lo cual se requieren estructuras soporte con mayores solicitaciones. Las empresas que anteriormente utilizaban sus espacios de almacenamiento para un tipo definido de carga están migrando a espacios multipropósito, exigiendo mayores solicitaciones y funcionalidad. Bajo la consigna de altas capacidades de carga en espacios pequeños y fácil cambio de configuración. Otra tendencia es la construcción estructural de lugares o bodegas de almacenamiento que sean auto soportables, es decir que la misma estructura utilizada para almacenar, sirva para soportar la cubierta, las diferentes redes que requiere este tipo de instalaciones, incluidas las eléctricas e hidráulicas, y paredes livianas laterales. Esto último también exige a los elementos estructurales mayor capacidad de carga.

Las estructuras soporte, las estanterías, están fabricadas en su mayoría a partir de perfiles rolados los cuales tienen dimensiones estandarizadas para optimizar el espacio y el material utilizado. Se ha hecho necesario buscar una forma de aumentar su capacidad de carga, sin aumentar en exceso su costo ni modificar su geometría.

Una de las formas de obtener una mayor capacidad de carga en el perfil es reforzándolo mediante la adición de barras de acero soldadas al interior del perfil, como se muestra en forma comparativa en la Figura 1-1.

Aunque esta opción no está muy difundida su uso comienza a popularizarse. La adición de las barras de acero incrementa la capacidad de carga y reduce el efecto del pandeo.

Figura 1-1: Perfil C de estantería sin refuerzo y con refuerzo. Fte. Autor.



1.2 Justificación

La necesidad de sistemas de almacenamiento más densos que exige la industria se traduce en retos que finalmente deben asumir los diseñadores e ingenieros. Algunos de estos retos son:






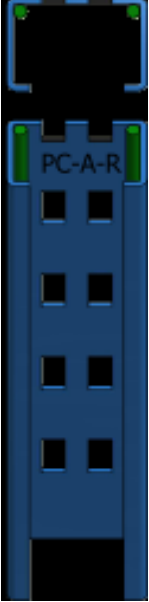
1. Aseguramiento de estructuras: Las empresas propietarias requieren que sus bienes sean asegurados. Las aseguradoras condicionan a los propietarios el aseguramiento, al cumplimiento de normatividades específicas para esta industria. Para tal fin los propietarios recurren a los fabricantes o a los certificadores que finalmente recurren a las empresas de diseño. Así, las empresas de diseño deben utilizar metodologías claras para el diseño y verificación de cumplimiento de estándares de las estanterías.
2. Los programas de desarrollo logístico en empresas implican que los sistemas de almacenamiento tengan mayor flexibilidad en diferentes direcciones:
 - a. Mayor densidad de almacenamiento, esto es, mayor capacidad de almacenamiento en volumen por unidad de superficie.
 - b. Mayor variabilidad geométrica, esto hace referencia a la posibilidad de cambiar geométricamente las configuraciones de las estanterías, permitiendo adaptarse a diferentes tamaños de cargas.
 - c. Mayor capacidad neta de carga. Con la universalización de los tamaños de referencia de carga, el comercio ha optado por densificar, los embalajes o empaques, y esto representa una mayor carga (kg) en el mismo volumen, que traducido en una estantería de la misma geometría significa mayor capacidad de carga neta.
3. Cambios en instalaciones de fabricación. Muchas industrias tienen esquemas de planta que funcionan alrededor de las configuraciones de perfiles estándares, los existentes y con muy poca variabilidad. El generar grandes cambios en las geometrías de los perfiles, implica una inversión costosa en varias etapas del proceso de fabricación, incluso del montaje. Este tipo de inversiones, aunque en algunas empresas pueda estar proyectado, se generan a mediano y largo plazo, requiriendo soluciones a corto plazo. En este punto también el diseñador se ve limitado a los perfiles existentes y las variaciones que se puedan realizar.
4. Aumento de capacidad de carga de las estructuras existentes o de conservar geometrías de perfiles existentes.
5. Muchas empresas que poseen ya estructuras de almacenamiento se encuentran con la necesidad de aumentar la capacidad en volumen y/o carga de las mismas. Ante este panorama se encuentran con el dilema de buscar otras nuevas estructuras que satisfagan las necesidades o, cuando los recursos no son suficientes, solicitan a los diseñadores la forma de utilizar las existentes, ajustándolas a su criterio para brindar mayor capacidad y seguridad.

Las anteriores, entre otras problemáticas, colocan a esta industria y principalmente a los ingenieros y diseñadores relacionados con el desarrollo de este tipo de productos a considerar alternativas de reforzamiento de los perfiles.

En la búsqueda de procedimientos, teorías o prácticas para el mejoramiento de la capacidad portante de los elementos no se han encontrado metodologías de análisis que describan el reforzamiento mediante barras soldadas. Este trabajo presenta una aproximación metodológica para el análisis y comportamiento de perfiles de lámina

delgada reforzados mediante barras de acero. Específicamente se desarrolló una metodología para perfiles en C con labios y perfiles en ángulo con labios. En la Tabla 1-1 se presenta un resumen informativo sobre las geometrías y nomenclatura utilizadas en este trabajo.

Tabla 1-1. Descripción gráfica de los perfiles de interés. Fte Autor.

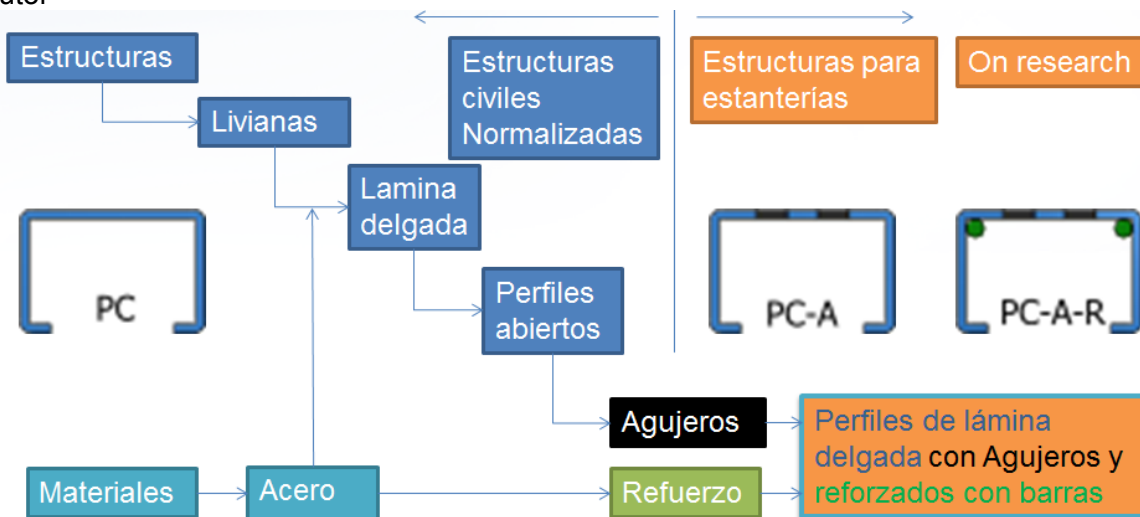
Sigla	Secciones sin refuerzo			Secciones con refuerzo		
	PL	PC	PC-A	PL-R	PC-R	PC-A-R
Descripción	Sección L, con labios en las aletas	Sección C, con labios en las aletas	Sección C, con labios en las aletas y perforaciones en el alma	Sección L, con labios en las aletas y refuerzo con barras en las esquinas de coincidencia entre aleta y alma	Sección C, con labios en las aletas y refuerzo con barras en las esquinas de coincidencia entre aleta y alma	Sección C, con labios en las aletas, perforaciones en el alma y refuerzo con barras en las esquinas de coincidencia entre aleta y alma
Símbolo						

1.3 Estado del arte

Para realizar una contextualización al lector de la ubicación específica de la investigación en el contexto científico, se presenta en la **Figura 1-2** un resumen general. El tema general de la investigación se encuentra en el ámbito de las estructuras, específicamente el de las estructuras livianas y entre estas se encuentran principalmente aquellas desarrolladas en lámina delgada con perfiles abiertos, las que corresponden como precursoras a los perfiles de lámina delgada para estanterías. Entre estas últimas la diferencia importante que las separa de acuerdo con la normatividad actual son los agujeros y específicamente la cantidad, tamaño y distribución. Agujeros grandes y muy espaciados son permitidos por

normatividades de estructuras civiles, sin embargo, agujeros pequeños y muy continuos no son cubiertos por la norma y es actualmente un tema de investigación y propuesta de diferentes centros de investigación a nivel mundial.

Figura 1-2: Mapa general de la ubicación de la investigación en contexto científico. Fte. Autor



Una nueva área de investigación está también relacionada con el reforzamiento de estructuras, específicamente el de estructuras livianas de acero y un ámbito especial los perfiles de lámina delgada. El reforzamiento de las estructuras de estanterías se establece como un tema pertinente debido a la creciente demanda de este tipo de estructuras y la necesidad de su reutilización y o uso con mayores cargas que las diseñadas inicialmente.

Lo anterior permite definir los criterios de búsqueda de información para recopilar el estado del arte específico de esta investigación: Perfiles de lámina delgada de acero, sometidos a compresión, secciones C o en ángulo con labios preferiblemente, con o sin refuerzo, con y sin agujeros.

1.3.1 Consulta bibliográfica

De acuerdo con los criterios de búsqueda relacionados con la investigación, se definieron las palabras y frases claves mostradas en la Tabla 1-2, tanto combinadas como de forma individual y tanto en Inglés como en español.

Las revistas con mayor relación a las referencias consultadas son:

- Computers & Structures,
- Engineering Structures
- International Journal of Structural Stability & Dynamics
- Journal of Constructional Steel Research
- Journal of Structural Engineering
- Latin American Journal of Solids & Structures

- Material Handling Management
- Thin-Walled Structures

Tabla 1-2. Tabla Resumen Palabras y frases incluidas en la búsqueda.

Español	Inglés
Diseño de Columna en acero para estanterías	Steel Rack Column Design
Columna de acero reforzadas para estantería	Reinforced Steel Rack column.
Columna de “acero reforzado” para estantería	“Reinforced Steel” Rack column
Marco para estantería en acero reforzado	Reinforced Steel Rack upright
Columna de acero reforzado con barra para estantería	Bar Reinforced Steel Rack column
Columna de acero para estantería	Steel rack Column
Marco para estantería en acero	Steel rack Upright Frame
Columnas en lámina delgada de acero	Cold-Formed Steel (CFS) Columns
Capacidad de carga	Load-carrying capacity
Comportamiento en Pandeo y Post-Pandeo	Buckling, Post-buckling behaviour

Adicionalmente las universidades e instituciones relacionadas con mayor frecuencia en las fuentes consultadas son:

- Universidad Politécnica De Catalunya-Barcelonatech – Barcelona España
- Politecnico Di Milano – Milán Italia
- Universidad de Cornell – Ithaca, NY USA
- The National University of Singapore, Structural Steel Research Group (SSRG), Singapore
- Johns Hopkins University, Baltimore, MD, USA
- The University of Sydney, School of Civil Engineering, Sydney, NSW, Australia
- University of Trento, Department of Mechanical and Structural Engineering, Trento, Italia
- Politehnica University of Timisoara, Department of Steel Structures and Structural Mechanics, Timisoara, Rumania
- Universidade Federal de Ouro Preto, Departamento de Engenharia Civil, Escola de Minas, OuroPreto-MG, Brazil
- AISI-American Iron and Steel Institut, USA
- Comité Europeo de Normalización – CEN- UE
- AENOR- Asociación Española de Normalización y Certificación – Genova -España
- RMI-Rack Manufacturers Institut- USA
- ICONTEC – Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación –Colombia

- AIS - Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica

1.3.2 Descripción general del estado del arte relacionado

El desarrollo de las estanterías ha estado muy relacionado con el avance y las investigaciones que en diferentes partes del mundo se realizan sobre el diseño de estructuras con perfiles de lámina delgada conformada en frío. Desde 1850 países como Estados Unidos y Gran Bretaña utilizaron lámina delgada para perfiles estructurales. Luego es publicada en 1946, la primera especificación AISI especializada en el diseño de miembros fabricados de acero conformado en frío, especialmente gracias al trabajo del Profesor George Winter de la Universidad de Cornell. A medida que se investigó más en esta área, dicha especificación fue actualizándose con los aportes de muchos otros investigadores, hasta la actualidad.

Específicamente en columnas de acero conformadas en frío usadas en estanterías, el primer documento relacionado con el estudio del comportamiento, trata sobre el comportamiento a pandeo y la resistencia de post-pandeo de elementos perforados a compresión [1], sugiriendo que la diferencia entre el comportamiento de un perfil estructural con agujeros y perfil para estantería con agujeros radica en la mayor cantidad y la variabilidad de posición y geometría de los agujeros. Winter y Pekoz por solicitud de RMI-Rack Manufacturer Institute generaron la especificación temporal para el diseño, prueba y uso de estanterías industriales de acero en 1972. Se oficializó esta especificación en 1974 y se actualizó principalmente por el trabajo de Pekoz en 1979, 1985, 1990, 2004 y 2012. De forma paralela [2] presentó comparaciones del pandeo distorsional desde resultados teóricos y experimentales de columnas usadas en estanterías. Ya en 1978, [3] aparecen patentes con específicas solicitudes relacionadas con los sistemas, la geometría o las conexiones en estanterías.

En adelante se hacen más frecuentes las investigaciones relacionadas, enfocadas a perfiles en compresión con diversas geometrías y específicos ensayos, entre otros:

- Diseño de estanterías conformadas en frío (Pekoz 1979)
- Estabilidad en estructuras de estanterías (Lewis 1991).
- Comportamiento a compresión de elementos perforados [4].
- Diseño de secciones de acero para columnas con perforaciones. [5]
- Análisis y diseño de almacenamiento. [6]
- Análisis y diseño de estanterías de Acero [7]
- Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica [8]







Desde 2000 se han multiplicado las investigaciones relacionadas con columnas a compresión, las cuales se pueden clasificar en alguno de estos grupos:

Análisis de pandeo local, distorsional o global en columnas por cargas axiales

- Formulación de Pandeo distorsional en Columnas de pared delgada, desde teoría general de vigas GBT. [9]
- Pandeo Local, Distorsional y global de columnas de pared delgada. [10]

- Cálculo de carga de pandeo distorsional puro de un elemento sujeto a compresión por MEF [11]
- Curvas de resistencia de diseño y formula de ancho efectivo para columnas conformadas en frío con pandeo distorsional [12]

Tabla 1-3. Autores e investigaciones relacionados con estudio de estimación de carga en perfiles conformados en frío. Fte Autor.

Tipo	Perfiles sin refuerzo			Perfiles con refuerzo		
	PL	PC	PC-A	PL-R	PC-R	PC-A-R
Tipo de perfil						
Literatura relacionada	1983 Madugula M. [31] 2005 Young, Ben [32] 2005 Young, Ben; Ellobody E.[33] 2012 Shi, G., Shi, Y.-J. [34] 2014, Shifferaw, Y. Schafer, B. W.[35]	1990 Hancock, Gregory J. [36–38][39] 1998 Young, Ben [40, 41] [42] 2002 Schafer, B [43] 2002 Schafer, W [10, 23] 2006 Rasmussen, Kim J.R [44] 2009 Young, B [45] 2009 Jakab, G [46] 2010 Meiyalagan, M. [47] 2013 Kalavagunta [48] 2013 Casafont, M [49] 2013 Kubiak, T [50] 2015 Bernuzzi, Claudio [51] 2016 Camotin, D [52]	1970 Yu, W [1] 1985 Hancock, Gregory J. [2] 1997 Davies, JM [5] 1998 Sivakumara, K [53] 1999-Pu; Godley [54] 2009 - Schafer, B [24] 2009 Schafer, W [23, 24, 55] 2011 Caparros Juan, [56] 2011 Casafont, M [57] 2012 Dubina, Dan [20, 58–60] [61] 2012 Rasmussen, Kim J.R. [25, 62] 2013 Kulatunga M, [63], 2014 Nedelcu, Mihai [64] 2014 Ren.,C [65] 2014 Smith, Frank [66] [67]	Sin reporte en la literatura	Sin reporte en la literatura	Sin reporte en la literatura
				Investigaciones indirectamente relacionadas: 2012 Zhuge, Yan; Mills, Julie E. Ma, Xing[68]	Investigaciones indirectamente relacionadas: 2006 Sivakumaran, K [69] 2008 Young, B [27] 2011 Haedir, J [28] 2014 Kalavagunta, S [26]	Investigaciones indirectamente relacionadas: 2008 Sivakumaran, K [30] 2009 Acharya, S [29]

Análisis del efecto de agujeros en capacidad a compresión

- Análisis de columnas de acero para estanterías[13].
- Análisis del pandeo elástico en estructuras de pared delgada [14]
- Análisis isoparamétrico lineal elástico por bandas finitas de columnas con perforaciones [15]

- Análisis geométrico isoparamétrico no-lineal elástico por bandas finitas de columnas con perforaciones [16]
- Análisis geométrico isoparamétrico no-lineal elástico por bandas finitas y de material de columnas con perforaciones, investigación numérica y analítica [17].
- Investigación experimental del pandeo distorsional de columnas de acero para estanterías [18]
- Ensayos de columna corta para diseño de estanterías según Euronorm C3 [19]
- Comportamiento de secciones conformadas en frío con perforaciones a compresión, investigación numérica y experimental [20]
- Análisis del pandeo lineal de columnas perforadas usadas en estanterías [21]
- Investigación del comportamiento de secciones conformadas en frío con perforaciones de diferentes configuraciones a compresión [22]
- Soluciones por método de bandas finitas al pandeo elástico de columnas con perforaciones [23]
- Pandeo elástico de columnas y vigas de acero conformadas en frío con huecos [24].
- Análisis del pandeo no elástico de perfiles con agujeros. [25]

Columnas conformadas en frío reforzadas de alguna forma

- Columna reforzadas con fibra de vidrio y cargada axialmente [26].
- Columna reforzadas con fibra de vidrio y matriz polimérica [27].
- Diseño de tubos cortos reforzados con fibra de Carbono y matriz polimérica[28]

Columnas o miembros conformadas en frío con perforaciones y reforzadas

- Vigas conformadas en frío, con perforaciones y reforzadas con láminas, experimentación[29].
- Vigas conformadas en frío, con perforaciones y reforzadas con láminas, Reporte de investigación [30][29].

La Tabla 1-3 relaciona las principales referencias de acuerdo con los criterios de búsqueda y los perfiles de interés de esta investigación.

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Determinar, a partir de métodos analíticos, el incremento en la capacidad de carga a compresión de un perfil doblado, tipo columna, para estanterías cuando se refuerza mediante barras de acero.

1.4.2 Específicos

- Identificar la geometría, dimensiones y materiales del perfil a estudiar.

- Desarrollar modelos que representen el efecto del refuerzo externo sobre las propiedades mecánicas de la sección.
- Proponer un método analítico para la estimación de cargas en perfiles doblados para estantería reforzados con barras de acero, basado en las disposiciones de las normas nacionales aplicables, que permitan la transición entre la geometría básica, geometría modificada y los criterios de diseño para perfiles doblados.
- Desarrollar y validar un modelo computacional a partir de elementos finitos que permita predecir la capacidad portante, de perfiles de lámina de acero doblados sin y con refuerzo, utilizando el programa ANSYS.

1.4.3 Alcance y limitaciones de la investigación

Los perfiles en estanterías tienen diferentes configuraciones de acuerdo con el fabricante y la aplicación específica. En el presente trabajo se seleccionó un tipo específico de geometría de perfil, el tipo C, el cual una vez reforzada, debería generar mayor capacidad de carga que la calculada inicialmente antes de ser reforzada.

Aunque las cargas a las que se encuentra sujeto un perfil de estantería son de compresión, flexión, torsión y sus combinaciones; en el presente trabajo solo se tendrá en cuenta la compresión, por ser la que representa el mayor componente de carga en un elemento de estantería y para facilitar el análisis en todos los ámbitos del presente trabajo.

Este trabajo, aunque busca regirse por la normatividad relacionada, buscar realizar una primera aproximación metodológica para comprender el comportamiento de perfiles reforzados, más no se pretende con este trabajo generar metodologías de diseño para este tipo de perfiles.

1.4.4 Metodología

La metodología propuesta para el desarrollo del presente trabajo consistió en realizar la revisión del estado del arte de la investigación y desarrollar la definición del problema. En paralelo con lo anterior se desarrollaron habilidades de conocimiento requeridas para el planteamiento de modelos analíticos, matemáticos y computacionales. Una vez realizado lo anterior se desarrollaron de modelos de análisis y diseño, y se finalizó con el ejercicio de validación y aplicación, análisis de resultados y la elaboración del informe final.

1.5 Estructura del documento

A continuación se describe el título de cada capítulo y se da una breve descripción de su contenido con el ánimo de facilitar su organización y entendimiento.

Capítulo 1: Introducción

En este capítulo se presentan las motivaciones y justificaciones que dan origen al presente trabajo. Se describe el método de construcción del estado del arte, base para el marco teórico y los principales centros de desarrollo investigativo del tema relacionado. Se

definen los objetivos y limitaciones y se concluye con la presentación de la metodología propuesta para su respectivo alcance.

Capítulo 2: Marco teórico

Se realiza un desglose de los temas relacionados con el alcance del trabajo extraídos de las diferentes referencias encontradas, presentando al lector una aproximación básica a los términos y conceptos relacionados con la estimación de las cargas máximas a compresión en perfiles de lámina delgada. Se introduce la terminología básica al hablar de estanterías, componentes y la columna como objeto de estudio; los materiales usados, su conformado para obtener las columnas y lo relacionado con refuerzos a luz de la literatura existente. Se presentan los conceptos básicos para la comprensión del comportamiento de los perfiles, las metodologías para diseño de interés según el alcance del trabajo.

Capítulo 3: Modelos propuestos para la consideración del refuerzo

En este capítulo se describen las propuestas para la consideración del refuerzo a la luz del marco teórico, presentando el efecto esperado del refuerzo, y las diferentes propuestas con los ejemplos de cálculo respectivos. Culmina este capítulo con la selección final de la propuesta a usar.

Capítulo 4: Método propuesto para la estimación de carga

De acuerdo con el marco teórico, se describe el método actual usado para la estimación de la carga en los perfiles de estudio y desde este se presentan los ajustes sugeridos para abordar la estimación de la carga en los siguientes casos donde se incluyen: agujeros, refuerzos y la combinación de ambos.

Capítulo 5: Validación y aplicación del modelo propuesto

Con el objetivo de comparar los resultados del método propuesto se realizan dos tipos de ejercicios. El primero de validación, comparando los resultados de capacidad de carga a compresión de ensayos simulados y reales de la literatura con en el modelo propuesto y el modelo de elementos finitos. El segundo de aplicación, comparando en perfiles propuestos por el autor su capacidad de carga a compresión según el modelo de elementos finitos y el método propuesto por el autor. Se presenta una sección de análisis de resultados.

Capítulo 7: Conclusiones y trabajos a futuro

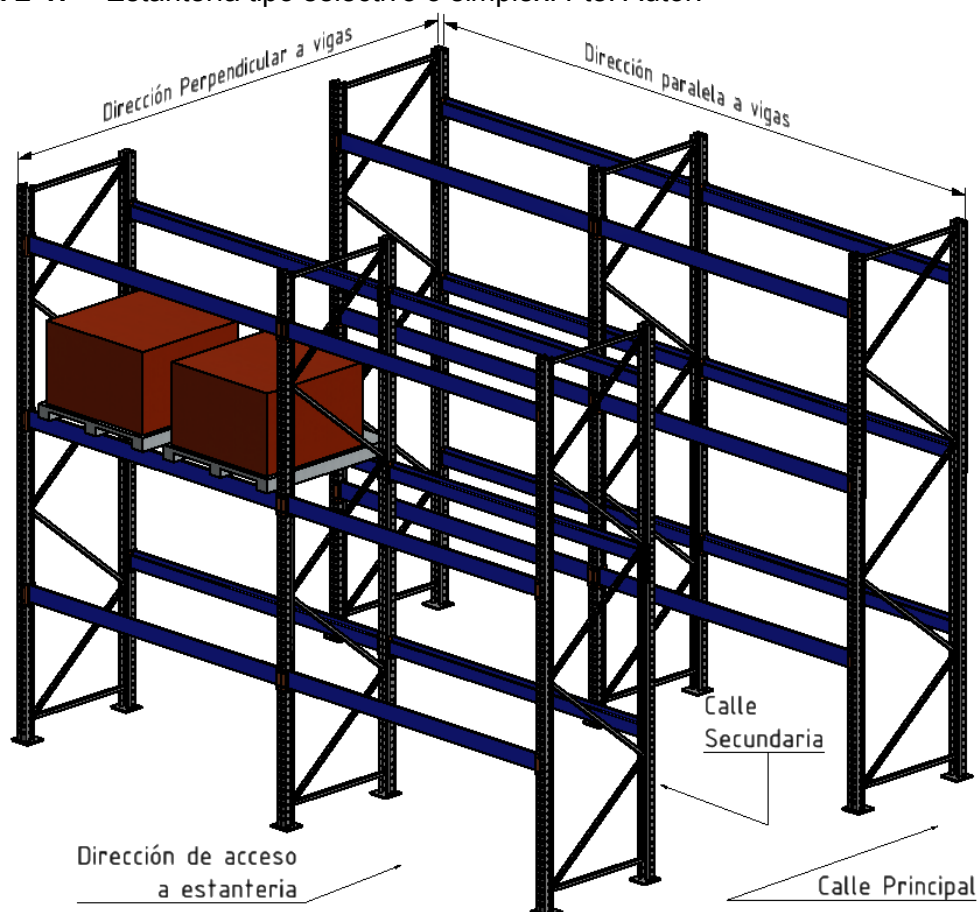
Finalmente se presentan las conclusiones del trabajo realizado, mostrando adicionalmente al lector posibles trabajos a futuro de acuerdo con la experiencia de realizar esta investigación y recomendaciones que permitan la continuación de la investigación realizada.

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Estanterías

Las estanterías son sistemas estructurales, diseñados específicamente para almacenar bienes. Existen diversos tipos de estanterías, variadas aplicaciones y formas de utilizarlas. La mayoría de configuraciones parten de una configuración básica basada en un esquema que se le conoce comercialmente como selectivo o simplex como en la Figura 2-1. Dicho esquema corresponde a una configuración en el cual las estanterías son ubicadas de tal forma que se forman calles secundarias en las cuales puede transitar la unidad de almacenamiento (usualmente una estiba con carga) desde y hacia una calle principal.

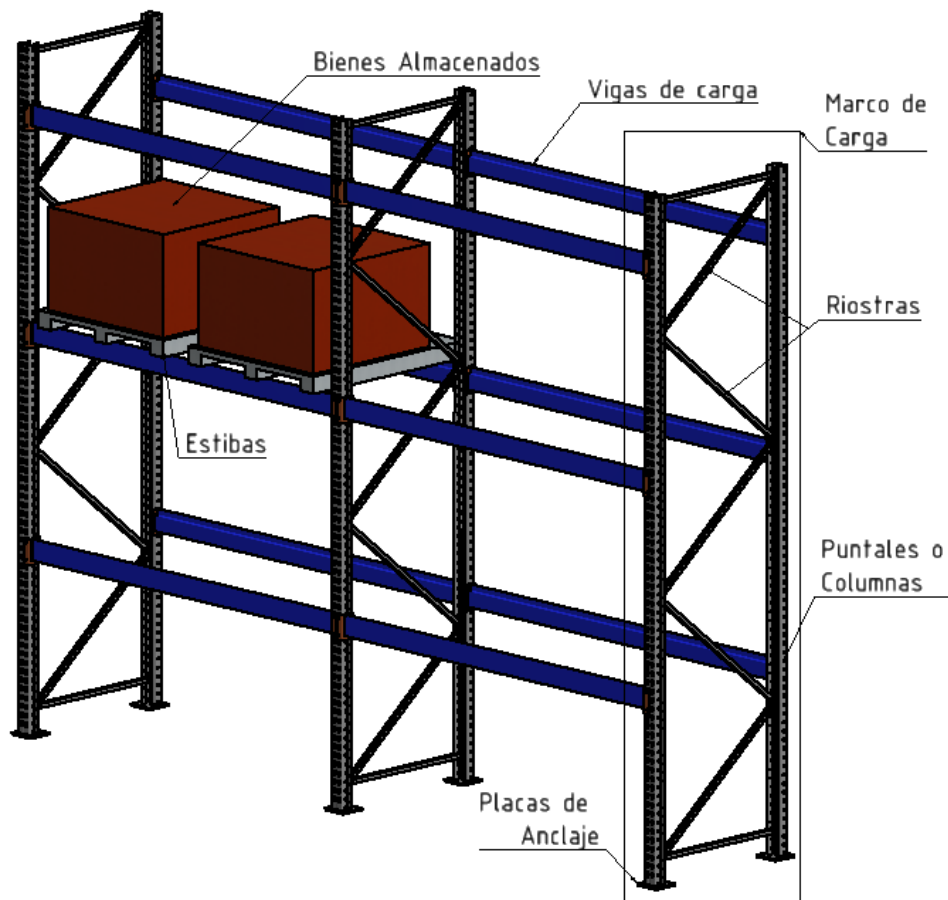
Figura 2-1: Estantería tipo selectivo o simplex. Fte. Autor.



De acuerdo con un plan de almacenamiento, dicha unidad puede ubicarse en cualquier sitio disponible y accederse sin mover otra unidad. De este esquema básico y con adaptaciones se parten hacia otros esquemas, con el fin de ahorrar espacio o densificar el almacenamiento, algunos ejemplos son: drive in, drive-through, automatizado, entre otras, etc.

En este esquema básico la estructura esta conforma por tres elementos básicos y sus conexiones: Anclajes, marcos de carga y vigas de carga. Los anclajes permiten la fijación de la estructura, y transferencia de cargas al suelo o a la estructura que la soporta. Los marcos de carga o parales transmiten las cargas de las vigas de carga a los anclajes. Las vigas de carga soportan el peso de los bienes almacenados y los transmiten a los marcos de carga, como se ilustra en la Figura 2-2. También puede observarse una de las principales características de este tipo de estructuras y que carecen de arrostramiento en la dirección de las vigas. En dirección perpendicular de las vigas, los marcos tienen arriostrados.

Figura 2-2: Partes de una estantería. Fte. Autor.

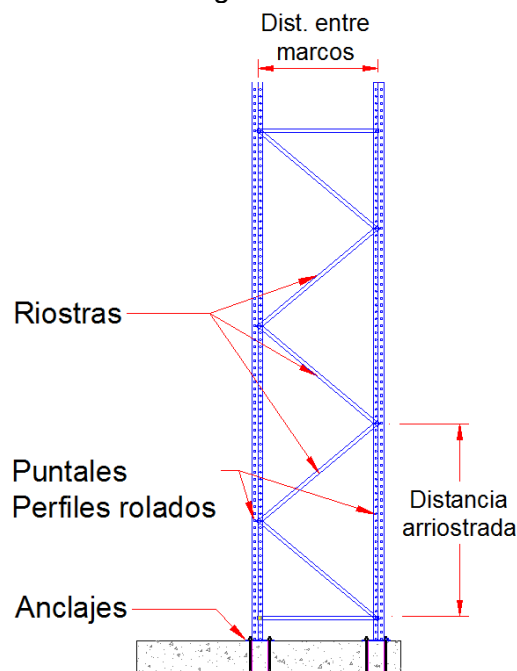


La configuración descrita obedece a cumplir el requerimiento básico de las estanterías que es el soporte de cargas con fácil acceso para carga y descarga. Esto se logra permitiendo que los marcos de carga queden paralelos a la dirección del movimiento de la carga y que

las vigas de carga sean perpendiculares a esta dirección. De acuerdo con lo anterior se tiene una estructura que en el sentido del movimiento de la carga es arriostrada por la geometría de los marcos y perpendicular a esta actúan las vigas como elementos de conexión entre marcos, generando momentos en cada marco de carga.

Los marcos de carga son referenciados como un elemento único estructural en las diferentes normas [70] (RMI, NTC 5689, etc.), pero tiene varios componentes, entre ellos, a saber: láminas de anclaje, arriostrados y puntales o columnas, objeto de este trabajo; ver Figura 2-3. Así, el marco de carga es un elemento estructural bidimensional que recibe las cargas de las vigas de carga y las transfiere por medio de sus anclajes al suelo o estructura de soporte. Los anclajes normalmente son elementos roscados de acero que fijan al suelo una lámina que está conectada por soldadura a la columna o puntal.

Figura 2-3: Partes de un marco de carga. Fte autor.



Los arriostrados son normalmente perfiles de geometrías que pueden ser circulares, cuadradas, tipo L, tipo U que se fijan a los puntales por uniones de tornillos o soldados. Los puntales o columnas son perfiles que pueden ser secciones estructurales laminadas o láminas conformadas por doblez o por perfilado (rolado).

2.2 Elemento Columna

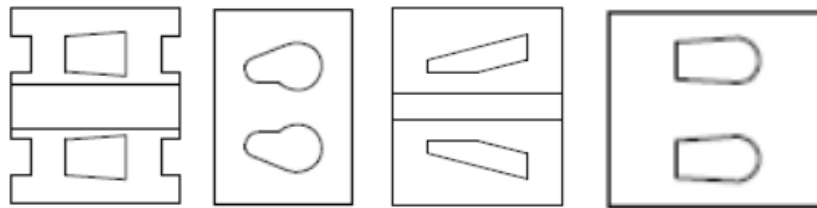
Los puntales o columnas, como elementos principales de los marcos de carga, son el objeto de estudio. Las columnas, en conjunto con los arriostrados y los anclajes, deben cumplir los siguientes objetivos funcionales fundamentales:

- Trasladar las cargas desde las vigas hasta el suelo.
- Permitir la fácil intercambiabilidad de posición de las vigas

- Permitir el ensamble del conjunto de marco: arriostrados y columnas anexas.
- Trasladar las cargas provenientes de los arriostrados
- Soportar su propio peso

Para cumplir con estos requerimientos los diseñadores han utilizado diferentes características geométricas del perfil, entre ellas la forma de la sección y adaptaciones longitudinales, especialmente agujeros para cumplir fácil y efectivamente el segundo objetivo funcional, como se puede ver en la Figura 2-4. La variación de estas dos características tiene implicaciones en diferentes aspectos del perfil: diseño, desempeño estructural, fabricación, material a utilizar, uso adecuado y costo entre otros. Algunos aspectos serán revisados posteriormente por ser necesarios para el completo abordaje del problema planteado.

Figura 2-4: Diferentes tipos de perforaciones longitudinales para permitir el fácil intercambio de posición de vigas en las columnas [71]



2.2.1 Tipos de sección

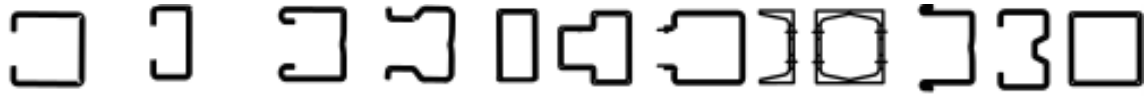
Los puntales o columnas son perfiles que pueden ser secciones estructurales laminadas o láminas conformadas por doblez o por perfilado (rolado). Las secciones estructurales laminadas pueden tener geometrías cerradas cuadradas, rectangulares o en I. Las secciones conformadas son fabricadas a partir de láminas planas para ser dobladas o de rollos de lámina para ser perfiladas.

Las secciones conformadas de lámina son geometrías normalmente abiertas de dos o más dobleces, ver Figura 2-5; y son de mayor uso comercialmente que las secciones laminadas, por esta razón en diferentes referencias [7, 19, 22] se analizan las secciones conformadas de lámina. Estas secciones parten de una geometría básica en forma de C y desde allí de acuerdo con los dobleces adicionales se van configurando otras geometrías.

Usualmente son simétricas respecto al eje perpendicular que cruza el centro de la cara central inicial, denominada alma. A los dobleces subsiguientes se les denomina aletas y/o rigidizadores. También se desarrollan perfiles no simétricos, aunque estos no son de gran uso en la industria por la dificultad que presentan para su ensamblabilidad.

Las dimensiones máximas de las secciones usualmente utilizadas comercialmente varían desde 30 a 150 mm por el alma y desde 35 a 145 mm por las aletas [10, 19][72].

Figura 2-5: Algunos tipos de secciones columnas de marcos de carga usados en estanterías y refuerzos utilizando los mismos perfiles [73].



2.3 Tipos de refuerzo para perfiles de estantería

Como parte del alcance de esta investigación se pretende evaluar el comportamiento de secciones reforzadas a compresión, para lo cual se presentará el caso específico de la sección reforzada con barras de acero.

Refuerzo con fibras y materiales compuestos

Debido a la cercanía con los miembros estructurales de lámina delgada, los perfiles de estantería podrían reforzarse de la misma forma. En algunas investigaciones se encuentran diferentes tipos de secciones con refuerzo principalmente en fibra de carbono [74, 75] en matrices poliméricas. Kalavagunta presenta en su propuesta un perfil en lámina delgada de acero tipo C de acero reforzado con láminas de fibra de carbono [26] ver **Figura 2-6**.

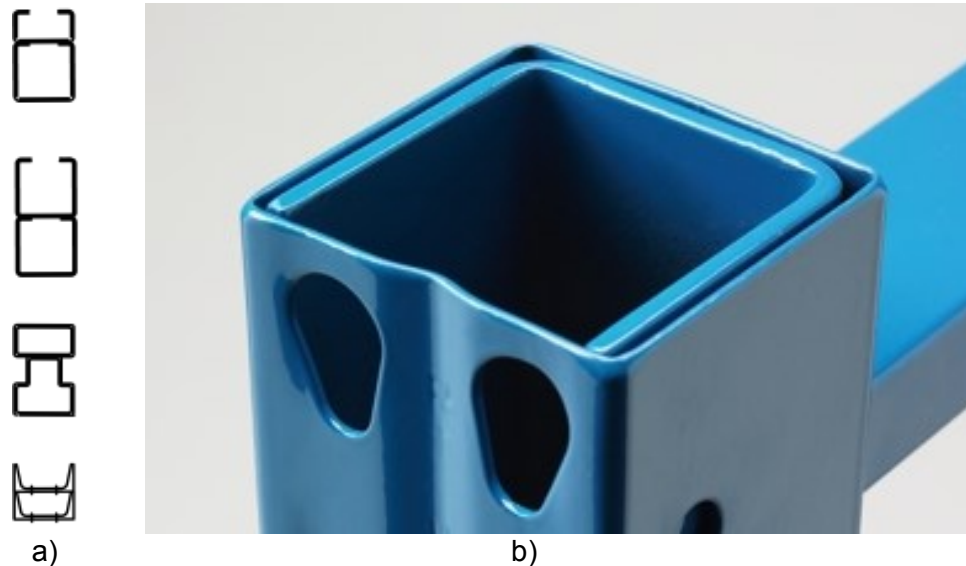
Figura 2-6: Perfil lámina delgada reforzado con CFRP [75].



Refuerzo con Perfiles compuestos de Láminas delgadas

Debido a las configuraciones ortogonales de algunos perfiles de lámina delgada, se han desarrollado refuerzos combinando geométricamente diferentes perfiles. También se encuentran en el estado del arte y en el ejercicio comercial refuerzos con perfiles estructurales como ángulos y láminas, como en la **Figura 2-7**.

Figura 2-7: Algunos tipos de secciones reforzadas para columnas de marcos de carga usados en estanterías: a) Combinaciones de perfiles básicos [73], b) ejemplo de perfil reforzado [76].



Refuerzo con Barras de acero

La propuesta del presente trabajo es aproximar un comportamiento del perfil reforzado con barras de acero, similar a los mostrados en la **Figura 2-8**.

Las barras de refuerzo son barras de acero estructural con o sin resaltes, según el estándar en Colombia NTC2289, poseen una resistencia a la fluencia mínima de 420 MPa y resistencia última a la tracción de 550 MPa. Los diámetros varían entre 6 a 35 mm, más en las aplicaciones del alcance del proyecto, por restricciones geométricas se pueden utilizar barras de 6 o 9 mm.

Existen comercialmente otras barras, de otras calidades, más en comparación con el precio, las barras de refuerzo son más económicas por su alta comercialización.

Figura 2-8: Refuerzo con barras de secciones de lámina delgada usados en formaletas. Fte autor.

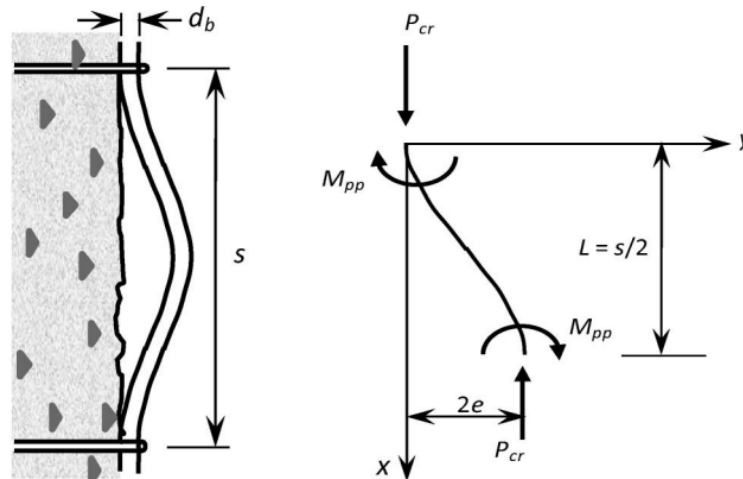


2.3.1 Comportamiento de barras de refuerzo a compresión

Las barras de refuerzo corrugadas tienen como aplicación práctica en las secciones compuestas con concreto, el soportar esfuerzos de tensión principalmente (barras longitudinales) y también de confinamiento. Normalmente en las aplicaciones actuales, en columnas de concreto reforzado, se considera el aporte del refuerzo a la compresión de la sección y cuando el acero de refuerzo deja de estar confinado o/y sin la presencia del concreto soporta la mínima carga axial de compresión.

Las teorías clásicas sobre columnas a compresión fueron brindadas por Euler en 1759, al hablar del pandeo de columnas, posteriormente Engesser en 1889, 1891 y Shanley en 1947, proponen y ajustan los criterios de Euler con el comportamiento post-pandeo de barras alineadas y desalineadas en sus extremos [77]. Los modelos teóricos modernos han involucrado soluciones basadas en teorías clásicas de pandeo plástico, como la planteada por Mander en 1983 y otras derivadas por enfoques de minimización de Energía como las planteadas por Gomes y Appleton en 1997; Dutta y Mander en 1998. Modelos computacionales han sido desarrollados utilizando dos enfoques principalmente: Análisis por elemento finito completo, como los realizados por Dhakal en 2002 y Gil-Martin en 2006; y el enfoque análisis por elemento fibra como los realizados por Dutta y Mander en 1998 y por Massone and Moroder en 2009 [78].

Figura 2-9: Planteamiento del problema de la resistencia a la compresión de barras de refuerzo en columnas de concreto reforzado, con barras expuestas [77]



Urmson y Mander [79], en 2012, realizan un análisis específico del problema de pandeo de barras de refuerzo longitudinales, que son analizadas como una barra a compresión con los extremos completamente restringidos, como se puede ver en la **Figura 2-9**. Allí, una barra de un diámetro específico, d_b , longitud s , se somete a una carga P_{cr} , generando deformaciones máximas, $2e$, perpendiculares a la carga en la mitad de los puntos de restricción del segmento analizado. Utilizando el concepto de pandeo de Euler, se halla la máxima curvatura, ϕ , y se puede derivar de ahí la solución ajustada para una barra de refuerzo con resaltes, Ecuación 2-1.

$$\frac{s}{d_b} = 6 \sqrt{\frac{\left(\frac{e}{d_b}\right)}{\phi d_b}} \quad (2-1)$$

Se puede encontrar el valor crítico utilizando las ecuaciones 2-2 y 2-3. Donde $(s/d_b)_{cb}$ es la relación de esbeltez crítica al pandeo, ϵ_{su} es la deformación en esfuerzo último, f_{su}^+ = esfuerzo último a tensión, f_{su}^- es el esfuerzo último a tensión invertido calculado a partir de la ecuación 2-4, f_{cb} es el esfuerzo crítico de pandeo y ϵ_y es la deformación en fluencia.

$$\left(\frac{s}{d_b}\right)_{cb} = \frac{2.34}{\sqrt{\epsilon_{su}}} \sqrt{\frac{f_{su}^-}{f_{cb}} - \frac{f_{cb}}{f_{su}^-}} \quad (2-2)$$

$$\frac{f_{cb}}{f_{su}^-} = \sqrt{1 + \frac{\pi^2}{1.47 \times 10^6 \epsilon_y^{1.5}} - \frac{\pi}{1200 \epsilon_y^{0.75}}} \quad (2-3)$$

$$f_{su}^- = f_{su}^+ (1 + \epsilon_{su})^2 \quad (2-4)$$

Urmson y Mander realizaron un análisis del comportamiento de barras de refuerzo a compresión, relacionando las cargas de compresión con el comportamiento y proponiendo modelos analíticos para predecir el esfuerzo último en situación de pandeo crítico y la deformación en el pandeo crítico, verificando el modelo analítico propuesto con datos experimentales y modelos computacionales, concluyeron que el modelo se puede utilizar para diseño de barras a compresión restringidas con relaciones s/d_b menores que 10. El comportamiento a pandeo en la zona plástica se puede caracterizar por la relación s/d_b , identificando para que valores menores a la relación de esbeltez crítica al pandeo, $(s/d_b)_{cb}$, la capacidad a compresión es limitada por pandeo y para mayores la capacidad de pandeo es limitada por resistencia. La relación entre el esfuerzo y la deformación que representa este comportamiento se calcula con la ecuación (2-5).

$$f_s = \frac{E_s \epsilon_s}{\left\{1 + |\epsilon_s / \epsilon_y|^{20}\right\}^{0.05} + \left(\frac{0.008}{\epsilon_y}\right) \left\{[1 + |\epsilon_s / 2 \epsilon_{cr}|^{40}]^{0.05} - 1\right\}} + (f_{cr} - f_y) \left[1 - \frac{|\epsilon_{cr} - \epsilon_s|^p}{\left\{|\epsilon_{cr} - \epsilon_{sh}|^{p20} + |\epsilon_{cr} - \epsilon_s|^{p20}\right\}^{0.05}} \right] \quad (2-5)$$

Donde, f_{cr} = esfuerzo último en situación de pandeo crítico; ϵ_{cr} = deformación al inicio del pandeo; f_y = esfuerzo de fluencia; E_s = Módulo de Young; ϵ_{sh} = Módulo a un ciclo de endurecimiento por deformación; f_u = esfuerzo último; and ϵ_f = deformación de fractura; $\gamma = 4$ acero de medio carbono and $\gamma = 2$ para aceros de alta resistencia; ϵ_{sh}^- = deformación al punto de inicio del ciclo de endurecimiento por deformación y el valor del exponente p , parámetro de control, calculado con la ecuaciones 2-6 y 2-7.

$$\epsilon_{sh}^- = 0.5(\epsilon_{sh}^+ + \epsilon_y) \quad (2-6)$$

$$p = E_{sh}(\epsilon_{cr} - \epsilon_{sh}) / (f_{cr} - f_y) \quad (2-7)$$

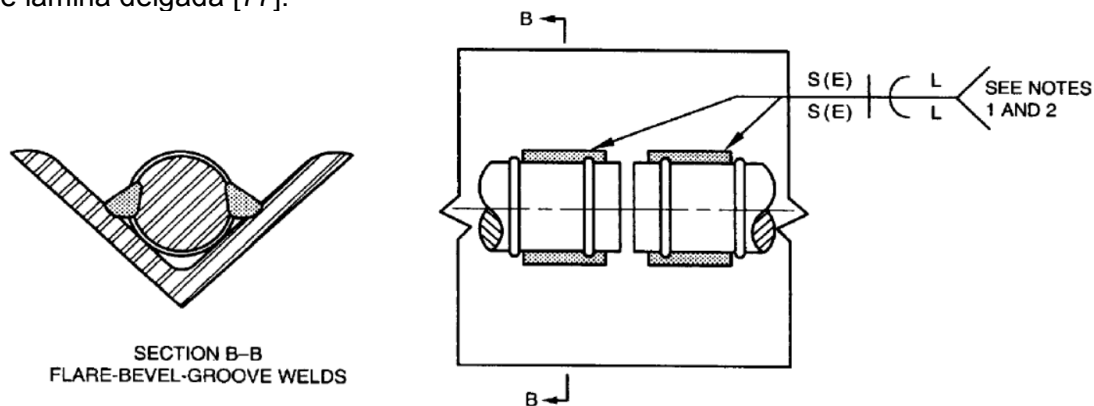
Lo anterior permite proponer que es necesario un espaciamiento máximo entre apoyos de barras de refuerzo (soldaduras con cierto espaciamiento a perfiles de lámina delgada sometidas a compresión) y que de acuerdo con el diámetro de la barra evite el pandeo local en barras restringidas a compresión.

2.3.2 Conexión entre perfil y refuerzo

La unión entre el perfil y el refuerzo se realiza con una soldadura normalmente del tipo SMAW (Soldadura Manual de Arco Sumergido), aplicando cordones de soldadura espaciados regularmente. También será posible usar otros tipos de unión que generen conexión entre la barra y el perfil, como fijaciones roscadas o adhesivos de última generación. En este trabajo se trata especialmente la soldadura por su practicidad en aplicación.

El diseño junta soldada correspondería a una junta de ranura biselada acampanada (Flare-Bevel-Groove Weld), como se muestra en la **Figura 2-10**. Debido a que el espesor de material base usualmente será menor a 4.76mm, la especificación apropiada a utilizar será la AWS D1.3.

Figura 2-10: Soldadura tipo que se utilizaría para la conexión entre la barra y la sección de lámina delgada [77].



En el reglamento NSR-10 [80], que trata sobre la construcción con perfiles de lámina delgada de acero, se presenta una metodología de cálculo aproximado para determinar la resistencia longitudinal de un tipo similar de soldadura: , Sección F-4.5.2.5 Soldadura Abocinada en media V, cargada longitudinalmente, del tipo de llenado no a ras de superficie. Aquí la garganta efectiva de la soldadura se define por $0.707 w_1$, donde w_1 es el menor espesor en la base de la soldadura.

El efecto de la temperatura por la soldadura en las propiedades mecánicas de la lámina delgada se puede tener en cuenta en su afectación en la parte plana donde se realizaría la junta (metal base de lámina delgada, metal base barra de refuerzo y material de aporte). Investigaciones realizadas en la Universidad de Cornell y reportadas por Yu [81], indicaron reducciones en la capacidad de la sección neta. Sin embargo, el efecto deseado de la soldadura es evitar el pandeo de la barra de acero, y no transferir carga significativa

longitudinalmente. Por tanto, el efecto neto será el cambio que se encuentre por la afectación térmica. En la parte doblada, la investigación de Comisión Europea en su investigación EUR21973 [82] indica que el efecto de la soldadura en las zonas con dobleces en láminas en frío, tiene un efecto similar de normalizado, reflejado en una recuperación de la ductilidad del material cercano al material plano y disminuyendo el efecto del aumento de la fluencia por el trabajo en frío.

2.4 Materiales de columnas y procesos de fabricación

2.4.1 Materiales

Los materiales utilizados en perfilería de acero para estanterías en Colombia varían entre los diferentes fabricantes y de acuerdo con las necesidades del proyecto. En la Tabla 2-1 se presentan los diferentes tipos de aceros más usados, verificando que todos se encuentran entre los materiales aplicables por la norma AISI S-100- 2007[83].

Tabla 2-1. Materiales usados en perfiles para estanterías en Colombia. Fte [80] adaptado por Autor.

Materiales	Esfuerzos Fluencia mín. (MPa)	Esfuerzo Ultimo Mín. (MPa)
A-572 Gr.50	350	480
A-36	250	400
A-283 Gr.C	200	380
SAE1008 Gr.30	200	310
SAE1011 Gr.30	200	335

En adición a las propiedades mecánicas principales, otras propiedades son tenidas en cuenta al seleccionar el material, especialmente la conformabilidad y la durabilidad. La conformabilidad tiene una gran importancia debido al trabajo en frío que es inducido para generar la forma del perfil, haciendo que se genere una modificación de las propiedades, especialmente en los dobleces.

Los espesores de material usado en Colombia están entre 0.13 y 2.5 mm [84], utilizando principalmente los espesores de 1.2 mm, 1.5 mm, 1.9 mm, 2.0 mm y 2.5 mm principalmente en la industria de las estanterías.

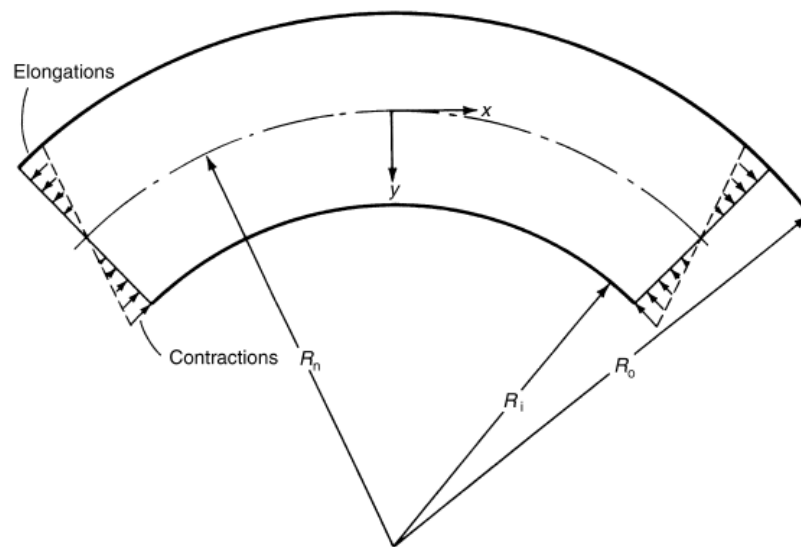
2.4.2 Proceso de doblado

El doblado se define en ASM Metals HandBook Volume 14B[85], como una operación para generar deformaciones permanentes localizadas en un chapa, esto ocurre esforzando una parte de la chapa respecto a otra u otras partes que funcionan como puntos fijos de referencia, resultando en una deformación no uniforme, sin falla, en la sección transversal del doblado.

En el doblado de chapa, ocurre un efecto de compresión en el lado interno del doblez y de tensión en el lado externo generando un gradiente de deformaciones a través del espesor de la pieza de trabajo en la zona del doblez, como en la Figura 2-11. La deformación por tensión es máxima en la superficie de la chapa externa, mientras la deformación por compresión es máxima en la superficie interna, y estos valores disminuyen a medida que se alejan de la superficie, generando un punto teórico en la sección donde la deformación es cero, este punto se denomina el eje neutro, y la longitud de este eje se conserva entre la pieza antes del doblez y después del doblez. Así se generan también los radios internos y externos del doblez y el radio del eje neutro.

La variación de esfuerzos de máxima tensión en la superficie externa a cero en el eje neutro y luego a máxima compresión, generan diferentes estados en el espesor del doblez. En la superficie externa e interna se superan los límites elásticos del material, llegando a las zonas de deformación plástica sin superar el esfuerzo último, evitando el daño del material.

Figura 2-11: Configuración típica de un doblado en una prensa dobladora en una matriz con abertura vertical [85].

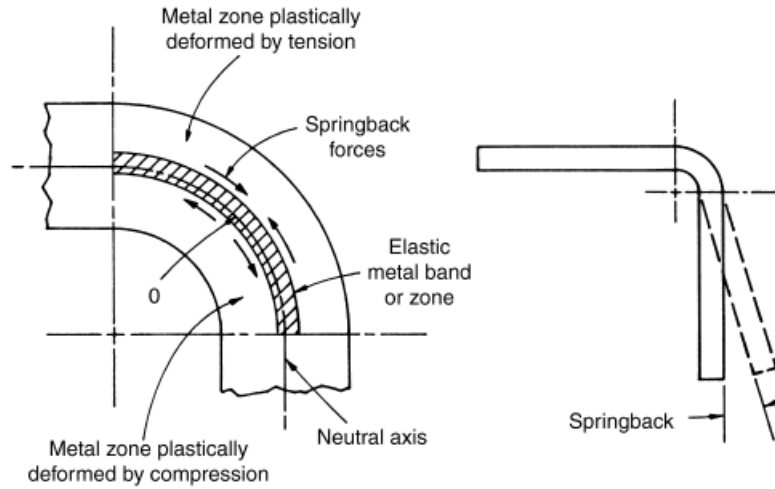


Pero a medida que se evalúan los esfuerzos hacia el eje neutro, una banda de material limitado por un arco paralelo al eje neutro, como en la Figura 2-12, no habrá superado el límite elástico después del doblez e intenta, volver a su forma original, haciendo que el doblez se devuelva cierto grado dado el equilibrio entre las zonas deformadas elásticamente y las deformadas plásticamente, generando el efecto de recuperación elástica o “Springback”. La corrección de este efecto de recuperación elástica es una de las características del diseño de herramientas en los diferentes procesos, buscando obtener la geometría deseada.

El doblado en frío corresponde a un trabajo en frío sobre el material, lo cual genera esfuerzos residuales. Estos esfuerzos residuales se evidencian en el incremento de la resistencia última a tensión y el límite de fluencia, con la respectiva disminución de ductilidad en la

zona del doblé. Estas variaciones dependen de diferentes factores como el tipo de acero, radio y ángulo de doblé y el espesor del material [86]. Varios autores [67, 87] han realizado verificaciones experimentales y simulaciones encontrando que las ecuaciones de Estándares Americanos y Europeos para calcular el incremento en el límite de fluencia presentan valores similares a los experimentales. Las ecuaciones están presentes en NSR-10 y calculan el valor de F_{ya} , Esfuerzo de fluencia promedio de la sección completa no reducida, de acuerdo con la ecuación (2-8).

Figura 2-12: Representación de las fuerzas que actúan en el efecto de recuperación elástica [85]



$$F_{ya} = C * F_{yc} + (1 + C)F_{yf} \leq F_{uv} \quad (2-8)$$

Donde C es la relación entre el área de las esquinas y el área de la sección transversal completa, para miembros en compresión; o relación entre el total del área de las esquinas de la aleta que controla y el área de la aleta que controla, para miembros en flexión, F_{yf} es la media ponderada del punto de fluencia a tensión de las porciones planas o el punto de fluencia del acero virgen si no se realizan ensayos. El valor de F_{yc} , el esfuerzo de fluencia a tensión de las esquinas se calcula con la ecuación (2-9).

$$F_{yc} = B_c * F_{yv} * \left(\frac{R}{t}\right)^{-m} \quad (2-9)$$

Donde B_c , se calcula con la ecuación 2-10 y m con la ecuación 2-11, R es el radio interno del doblé, t es el espesor de la lámina, F_{yv} , esfuerzo de fluencia a tensión del acero virgen y F_{uv} es resistencia a tensión del acero virgen.

$$B_c = 3.69 \frac{F_{uv}}{F_{yv}} - 0.819 \left(\frac{F_{uv}}{F_{yv}}\right) - 1.79 \quad (2-10)$$

$$m = 0.192 \frac{F_{uv}}{F_{yv}} - 0.068 \quad (2-11)$$

Un trabajo experimental paralelo en este trabajo fue validar de forma experimental el incremento del Esfuerzo de fluencia en la parte doblada, cuyos resultados se pueden ver

en Anexo B 9.5. En la hoja de cálculo desarrollada para la estimación, se deja opcional el uso o no de este efecto, tal como está también considerado en la NSR-10.

2.4.2.1 Doblado en prensa

En la Figura 2-13, se puede apreciar un detalle específico del doblado de una lámina. En el doblado en prensa la pieza a doblar la chapa es ubicada sobre una matriz abierta (punto fijo) y es presionada hacia dentro de la matriz por el punzón. La distancia que el punzón entra en la matriz determina el ángulo de doblado y el ancho de apertura de la matriz afecta la fuerza necesaria para doblar la pieza. En la Figura 2-14 se puede ver la más común de las matrices, matriz en V de 90 grados y comercialmente se utiliza con el punzón tipo Gooseneck, que permite variadas formas y aplicaciones o con punzones especiales dependiendo del tipo de aplicación.

Figura 2-13: Configuración típica de un doblado en una prensa dobladora en una matriz con abertura vertical. [85].

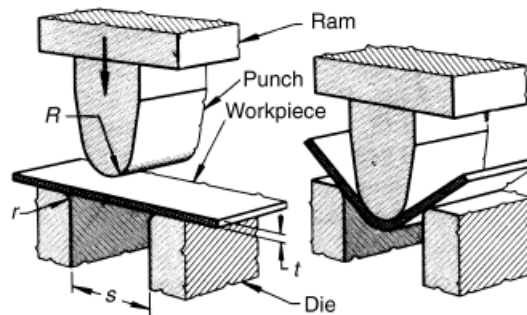
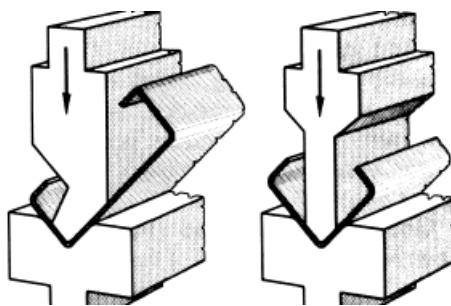


Figura 2-14: Punzones y matrices comerciales. [85]. Izq. Matriz en V, Punzón Gooseneck. Der. Matriz en V y Punzón de cuerpo delgado.



En este tipo de doblado se utilizan dos tipos de ajustes para compensar la recuperación elástica. Sobre-doblado ó *overbending* que significa utilizar herramientas que generen un doblez mayor sobre el material que al recuperarse tenga la dimensión requerida, por ejemplo, para un doblez de 90 grados, el material se dobla a 88 grados, teniendo la diferencia para compensación. Otra manera es el reducido de sección en el doblez por medio de una alta presión en la zona de radio del doblez por medio de una protuberancia

de radio pequeño en la punta del punzón, que genera que la mayoría del metal se comporte plásticamente evitando así la recuperación.

Este proceso se puede utilizar para piezas cortas o largas en el sentido paralelo al doblado y cortas en la dirección transversal, como lo son los perfiles para marcos de estanterías. Usualmente las prensas para este tipo de perfiles tienen camas de más 3 metros de longitud, capacidades de acuerdo con el tipo y espesor de material.

2.4.2.2 Conformado por rodillos

El perfilado en frío o conformado por rodillos, es un proceso continuo de conformado de metales desde láminas planas, bandas o rollos hasta secciones transversales de forma uniforme, por medio de la alimentación del metal a una serie de estaciones de rodillos con contornos predefinidos, que conforman progresivamente el metal de una estación a otra para generar una tira continua de material con la sección deseada. El doblado del material es realizado en los rodillos contorneados sin variar el espesor del material, excepto en algunos casos en la zona del doblado. El equipo de conformado por rodillos no es un equipo que sea reconfigurable fácilmente, diferente a la prensa dobladora, es afectado principalmente por el material (propiedades, espesor, ancho), la sección a conformar (dimensiones y complejidad) y la precisión requerida. En la Figura 2-15 se muestra un equipo de conformado por rodillos con los equipos auxiliares.

Figura 2-15: Esquema general de una conformadora por rodillos [85].

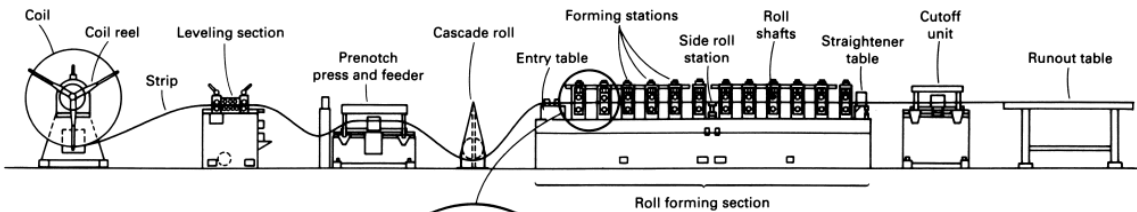
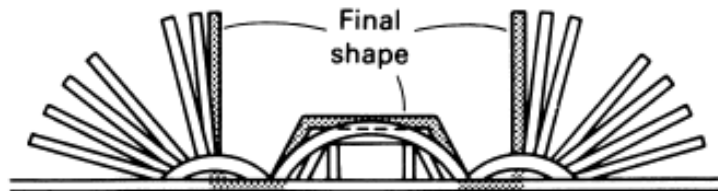


Figura 2-16: Diagrama de flor para determinar el número de estaciones [85].



De acuerdo con la complejidad de la sección y el material, es definido el número de estaciones de rodillos, si son pocas se causa distorsión en la sección y si son muchos se aumenta el costo del proceso. Para la definición se utiliza la flor de la sección que es un diagrama que esquematiza como se va transformando la chapa plana progresivamente en la sección considerada, como en la Figura 2-16.

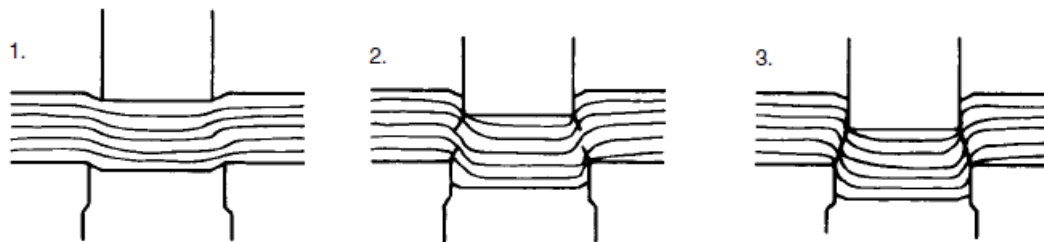
2.4.3 Proceso de punzonado

El punzonado es un proceso por el cual se generan agujeros de diferentes geometrías en una chapa, especialmente para generar conexiones con otros elementos. El proceso de punzonado consiste en el uso de un punzón y una matriz para separar el material delimitado por el perímetro del agujero del material base. Como se muestra en la Figura 2-17, el proceso se genera inicialmente una deformación plástica al indentar el punzón contra la matriz con la chapa de trabajo por medio. Luego al continuar la penetración se genera una severa deformación en cortante entre el borde, el punzón y la esquina de la matriz, formándose grietas unas desde la matriz hacia el punzón y viceversa del punzón a la matriz. En la última etapa se produce un desgarramiento de la pieza cortada, generándose una rebaba alrededor del perímetro de salida del agujero.

2.4.4 Industria en Colombia

En consulta de servicios es más común el proceso de doblado por prensa que el de conformado por rodillos, debido a la adaptabilidad que tiene la máquina para otros procesos. De acuerdo con el proyecto gran parte de los perfiles utilizados para estantería se fabrican en longitudes de hasta 3 metros por la limitación de la longitud de las mesas de las máquinas de doblado.

Figura 2-17: Representación del Proceso de punzonado. 1. Deformación Plástica; 2. Deformación con Cortante 3. Fractura por arrancamiento [85].



Existen conformadoras de rodillos que son versátiles para diferentes tipos de sección, y funcionan para grandes cantidades de una misma sección como en el caso de proyectos especiales para estantería.

Para los perfiles de estanterías, primero se corta la lámina, se punzona y luego se conforma el perfil, cuando se hace el proceso con prensa dobladora. La diferencia cuando se utiliza una conformadora por rodillos es que no se corta el perfil previamente si no que se corta una vez se conformado el perfil.

Para esta industria se tienen varios problemas debido a los equipos, los sistemas de producción y los volúmenes de fabricación, entre ellos:

- Falta de rectitud
- Recuperación elástica
- Superficie
- Distorsión por corte y punzonado

- Precisión de los equipos
- Desgaste

2.5 Análisis de perfiles de lámina delgada

El comportamiento de un elemento estructural de lámina delgada conformado en frío a compresión ha sido estudiado desde principios de siglo XX [81], cuando comenzaron a utilizarse en construcciones de estructuras. Desde esa época se han realizado diferentes investigaciones para definir una apropiada especificación para el uso y diseño de este tipo de perfiles.

La teoría de placas considera según el espesor relativo de la placa respecto a su tamaño característico lineal. Si esta relación es mucho menor a la unidad, la teoría de Kirchhoff and Love describe con una precisión satisfactoria los esfuerzos y las deformaciones en una placa a flexión, pero a medida que el espesor de la placa aumenta, los errores tienden a crecer y es necesario reformular el problema respectivo elásticamente en tres dimensiones. Esta última reformulación es conocida como análisis de placas gruesas o teoría de Reissner, que por la naturaleza de la investigación no será presentada aquí y por lo tanto se presentará el enfoque relacionado con carga a compresión.

Comportamiento a compresión e inestabilidad en el rango lineal

Una de las fallas de los elementos estructurales de acero conformado en frío de lámina delgada a compresión es el pandeo, que es la pérdida de capacidad portante de un elemento a compresión por un desplazamiento lateral. En el pandeo, a diferencia del comportamiento a compresión directa desde una visión de mecánica estructural, se tiene en cuenta que para este tipo de perfiles el espesor es mucho menor que el ancho de los elementos, generando esto un comportamiento diferente desde el punto de vista local y global. Así toma importancia la relación ancho respecto al espesor, pues estos elementos pueden pandearse con magnitudes de esfuerzos a compresión menores que su esfuerzo de fluencia, la carga que produce este pandeo se denomina carga crítica.

Lo más común es encontrar una sección compuesta de diferentes elementos, provenientes de tomar una lámina plana y realizar dobleces que permiten rigidizar un panel respecto al otro, este tipo de elementos se les denomina rigidizados si tiene dobleces en ambos lados y cumplen ciertos requisitos. Las placas pueden estar rigidizadas en un solo borde y se les denomina no rigidizados o tener dobleces en ambos lados, pero no cumplir ciertos requisitos mínimos, se les denominará parcialmente rigidizado, y en otros casos incluso tener rigidizadores intermedios.

El comportamiento estructural de los elementos de lámina delgada cuando son cargados a compresión se pandean y dicho comportamiento es descrito resolviendo la ecuación 2-12, que es la ecuación de diferencial de Bryan, donde D está definido por la ecuación 2-13.

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + \frac{f_x t}{D} \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0 \quad (2-12)$$

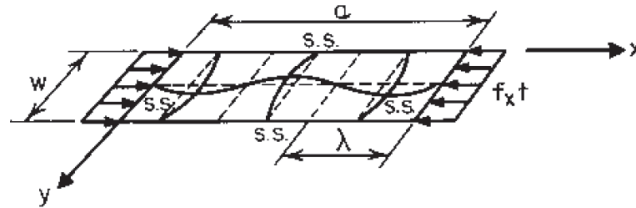
$$D = \frac{Et^3}{12(1-\mu^2)} \quad (2-13)$$

La ecuación de Bryan está basada en la teoría de bajas deflexiones y permite calcular la carga crítica de pandeo, P_{cr} , para una lámina delgada de ancho w , y largo a , como la mostrada en la **Figura 2-18**, con espesor, t , módulo de Poisson, $\mu=0.3$ (para los aceros); módulo de Elasticidad, $E=200$ GPa; y teniendo en cuenta que al ser sometida a un carga de compresión uniforme en la dirección x , f_x ; se tendrá como resultado una deflexión perpendicular a la superficie con magnitud, ω .

La solución de la ecuación de Bryan, para el sistema mostrado, teniendo en cuenta que la deformación de la placa es sinusoidal en ambas direcciones, deriva en la ecuación general de esfuerzo de pandeo Crítico, f_{cr} , para una placa sujeta a compresión en una dirección, ecuación (2-14), donde k , es el coeficiente de pandeo para placas rectangulares y está determinado para diferentes configuraciones de cargas, tipo de apoyo y se pueden determinar con la ayuda de la **Figura 2-19**.

$$f_{cr} = \frac{k\pi^2 E}{12(1-\mu^2)(\frac{w}{t})^2} \quad (2-14)$$

Figura 2-18: Placa rectangular sometida a compresión [81].



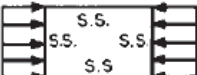

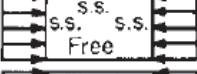
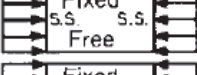
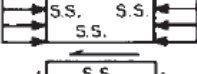
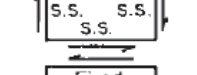

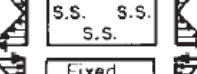

2.6 Diseño de perfiles de lámina delgada

2.6.1 Aportes relevantes

Al respecto del diseño de placas delgadas a compresión con pandeo, el hecho más temprano registrado es relacionado con el diseño del puente Britannia en 1845, que fue reportado por Bryan [88] en 1891, con la solución del pandeo inicial de una placa cuadrada simplemente soportada. Luego otros autores continuaron con propuestas de soluciones para placas en otras configuraciones de apoyo, entre ellos Timoshenko [89].

Hasta 1930 todas las soluciones estaban relacionadas con cargas críticas y estabilidad, y en ese momento Schuman y Back [90] desarrollaron ensayos para determinar la resistencia última de placas de diferentes materiales y geometrías, concluyendo que en las placas después del pandeo ocurriera un efecto en el que solo una parte del ancho soporta efectivamente la carga.

Figura 2-19: Valores de k [81].

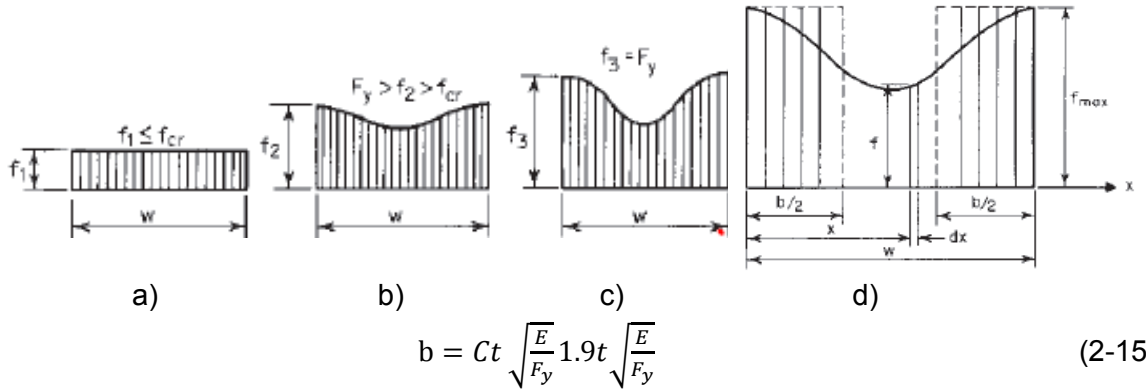
Case	Boundary Condition	Type of Stress	Value of k for Long Plate
(a)		Compression	4.0
(b)		Compression	6.97
(c)		Compression	0.425
(d)		Compression	1.277
(e)		Compression	5.42
(f)		Shear	5.34
(g)		Shear	8.98
(h)		Bending	23.9
(i)		Bending	41.8

En 1932, Von Karman et al. [91] propusieron las primeras expresiones para el ancho efectivo de acuerdo a las siguientes suposiciones:

- Pandeo: Una placa plana como en la **Figura 2-20** rectangular simplemente apoyada en los lados es sujeta a compresión entre placas rígidas planas en los bordes superior e inferior, por lo tanto, hay una distribución homogénea del esfuerzo en el instante antes del pandeo a un esfuerzo crítico de pandeo. Lo anterior genera un desplazamiento lateral, perpendicular al plano, en toda la sección excepto en los bordes debido a las restricciones.
- A medida que se aumenta la deformación lateral y el esfuerzo permanece substancialmente constante en el centro de la placa, en los bordes debido a la restricción, el esfuerzo se incrementa hasta el punto de fluencia de la placa. Este es el punto máximo de resistencia de la placa. En la zona cerca a los bordes el esfuerzo se encuentra entre el crítico de pandeo y el esfuerzo de fluencia. Ahora el esfuerzo crítico de pandeo es muy pequeño respecto al de fluencia y por eso se puede ignorar.
- El problema fue reducido a dos placas laterales de ancho w bajo una distribución de esfuerzo desde cero hasta esfuerzo de fluencia.
- Para facilidad se puede asumir que los tramos de placa laterales tienen un ancho w_1 menor que w y están completamente esforzados en fluencia. A la suma de los sub-anchos de placa, se le llamó ancho efectivo, calculada con la ecuación 2-15.

Desde 1939, Winter G. de la Universidad de Cornell, condujo un proyecto para el comité de Investigación y Tecnología de construcción de la AISI, con el objetivo de estudiar el desempeño de miembros estructurales de acero de bajo espesor conformados en frío, resultando en un aporte importante para la formulación de una especificación para el diseño de este tipo de miembros [92].

Figura 2-20: Placa de desarrollo de teoría de Von Karman [81][4]. a) Carga distribuida menor que carga elástica crítica. b) Carga mayor a la carga elástica crítica y menor al esfuerzo de fluencia. c) Carga mayor o igual al esfuerzo de fluencia. d) Redistribución teórica para hallar el ancho efectivo.



Donde

b: ancho efectivo

t: espesor de la placa

E: Modulo de elasticidad

F_y : Esfuerzo de Fluencia

En este proyecto se desarrollaron diferentes métodos de diseño relacionados con diferentes temas, entre otros: ancho efectivo de elementos a compresión rigidizados, la reducción del esfuerzo de trabajo para elementos no rigidizados a compresión, efectos del conformado en frío en las propiedades del material, interacción entre el pandeo local y global, resistencia de elementos a compresión perforados, rigidizadores intermedios y de borde, estructuras para estanterías, entre otras [81].

Winter realizó varios experimentos y propuso un ajuste a la ecuación 2-15 obteniendo la ecuación 2-16

$$b = 1.9t \sqrt{\frac{E}{f_{max}}} \left[1 - 0.475 \left(\frac{t}{w} \right) \sqrt{\frac{E}{f_{max}}} \right] \quad (2-16)$$

Donde

b: ancho efectivo

t: espesor de la placa

E: Modulo de elasticidad

w: ancho de la placa

f_{max} : esfuerzo en el borde de la placa.

El proyecto de la Universidad de Cornell, continuado por Winter G y Teoman Pekoz hasta 1968 en compañía de Karren, Winter, Chajes, Britvec y Uribe entre otros incluyeron temas como: efecto de los esfuerzos residuales en la resistencia de la sección, unificación de experimentos y criterios de diseño, pandeo distorsional en vigas y columnas, efecto de cargas excéntricas en columnas con rigidizadores de labio, entre otras. Hasta llegar a la ecuación 2-17, donde los ajustes a partir de la comparación de los resultados, fue la modificación del factor de la relación ancho espesor.

$$b = 1.9t \sqrt{\frac{E}{f_{\max}}} \left[1 - 0.415 \left(\frac{t}{w} \right) \sqrt{\frac{E}{f_{\max}}} \right] \quad (2-17)$$

En 1986, la AISI luego de verificar que la ecuación correlacionaba bien los elementos rigidizados con pequeñas o ningunas restricciones rotacionales a lo largo de ambos bordes longitudinales, se adoptó la forma adimensional de definir el ancho efectivo para elementos rigidizados sujetos uniformemente a compresión, b , con el factor de reducción ρ , y el factor de esbeltez λ , determinados de acuerdo con las ecuaciones 2-18, 2-19 y 2-20, respectivamente.

$$b = \rho w \quad (2-18)$$

$$\rho = \frac{1 - 0.22/\lambda}{\lambda} \leq 1 \quad (2-19)$$

$$\lambda = \left(\frac{1.052}{\sqrt{k}} \right) \left(\frac{w}{t} \right) \sqrt{\frac{f_{\max}}{E}} \quad (2-20)$$

Donde k es el coeficiente de pandeo local=4, para elementos rigidizados por un alma en cada lado. De las anteriores ecuaciones se derivan las ecuaciones para diseño en los estándares Norteamericanos [81], que son igualmente adoptados en Colombia en la NSR-10, tanto para determinación de la resistencia (F-4.2.2.1(a), NSR-10) [80], como para la determinación del estado de servicio (F-4.2.2.1(b), NSR-10) [80].

2.6.2 Cálculo de anchos efectivos

El ancho efectivo, según NSR-10 F.4.1.1.2 [80], es el ancho plano de un elemento reducido para propósitos de Diseño. Este ancho efectivo depende de las restricciones laterales del elemento, la distribución de carga y el tipo de cálculo de diseño que quiera desarrollar: diseño por resistencia o diseño por deformación. El cálculo del ancho efectivo de un elemento depende del tipo de Rigidización, su espesor y ancho nominal y se puede calcular de acuerdo con los valores de las tablas 2.2 a 2.4 según sea el caso.

Tabla 2-2. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos rigidizados a compresión uniforme. Fte [80] adaptado por Autor.

Parámetro	Nombre	Ecuación en NSR-10
w	Ancho nominal del elemento	
b=w ; si $\lambda \leq 0.673$ b=ρw ; si $\lambda > 0.673$	Ancho efectivo	F.4.2.2-1 F.4.2.2-2
$\rho = (1 - 0.22/\lambda)/\lambda$	Factor de reducción local	F.4.2.2-3
$\lambda = (f/F_{cr})^{0.5}$	Factor de esbeltez	F.4.2.2-4
$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$	Esfuerzo crítico, k=4	F.4.2.2-5
f= F_n	Esfuerzo de compresión	F.4.3.4.1

Tabla 2-3. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos no rigidizados a compresión uniforme. Fte [80] adaptado por Autor.

Parámetro	Nombre	Ecuación en NSR-10
w	Ancho nominal del elemento	
b=w ; si $\lambda \leq 0.673$ b=ρw ; si $\lambda > 0.673$	Ancho efectivo	F.4.2.2-1 F.4.2.2-2
$\rho = (1 - 0.22/\lambda)/\lambda$	Factor de reducción local	F.4.2.2-3
$\lambda = (f/F_{cr})^{0.5}$	Factor de esbeltez	F.4.2.2-4
$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$	Esfuerzo crítico; k=0.43	F.4.2.2-5
f= F_n	Esfuerzo de compresión	F.4.3.4.1

Tabla 2-4. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos con una pestaña de borde como rigidizador, tipo aleta. Fte [80] adaptado por Autor.

Parámetro	Nombre	Ecuación en NSR-10
w	Ancho nominal del elemento	
b=w ; si $w/t \leq 0.328S$	Ancho efectivo si no se necesita labio	F.4.2.4-1
b₁=(b/2)R₁ ; si $w/t > 0.328S$ b₂=b-b₁	Ancho efectivo si se necesita labio	F.4.2.4-4 F.4.2.4-5
S = 1.28*(E/f)^{0.5}		F.4.2.4-7
I_a= $399t^4 \left[\frac{w/t}{S} - 0.328 \right]^3 \leq t^4 \left[115 \frac{w/t}{S} + 5 \right]$	Momento de Inercia adecuado del rigidizador de tal forma que cada elemento componente se comporte como un elemento rigidizado.	F.4.2.4-8
R₁=I_s/I_a	Relación de Inercias	F.4.2.4-9

Tabla 2-5. Tabla de fórmulas para calcular el ancho efectivo en elementos con una pestaña de borde como rigidizador, tipo aleta. Fte [80] adaptado por Autor. (Continuación)

Parámetro	Nombre	Ecuación en NSR-10
$I_s = (d^3 t \sin^2 \theta) / 12$	Momento de Inercia de la sección completa del rigidizador alrededor de su propio eje centroidal paralelo al elemento a ser rigidizado.	F.4.2.4-10
d_s	Ancho efectivo reducido del utilizado en el cálculo de todas las propiedades de la sección efectiva	
d'_s	Ancho efectivo del rigidizador	
$\rho = (1 - 0.22/\lambda) / \lambda$	Factor de reducción local	F.4.2.2-3
$\lambda = (f / F_{cr})^{0.5}$	Factor de esbeltez	F.4.2.2-4
$F_{cr} = k \frac{\pi^2 E}{12(1 - \mu^2)} \left(\frac{t}{w} \right)^2$	Esfuerzo crítico; $k=0.43$	F.4.2.2-5
$k = 3.57(R_I)^n + 0.43 \leq 4$, si $D/w \leq 0.25$ $k = \left(4.82 - \frac{5D}{w} \right) (R_I)^n + 0.43 \leq 4$, si, $0.25 < D/w < 0.80$	Coeficiente de pandeo de placa $n = \left(0.582 - \frac{w/t}{4S} \right) \geq \frac{1}{3}$	Tabla F.4.2.4-1 (F.4.2.4-11)
$f = F_n$	Esfuerzo de compresión	F.4.3.4.1

2.6.3 Ancho efectivo debido a las perforaciones

En las diferentes normas para el diseño de perfiles de acero conformados en frío, se tiene en cuenta algunos conceptos para la inclusión del efecto de agujeros en el cálculo de capacidad del elemento. La NSR-10 (F.4.2.2.2) presenta dos opciones para evaluar el ancho efectivo de un elemento rigidizado o tipo alma que contiene agujeros. El primer enfoque mantiene la concepción del elemento como rigidizado y reduce el ancho efectivo en el ancho del agujero o más según su valor del factor de esbeltez. El segundo enfoque considera el agujero como un vacío completo y modifica la concepción a dos elementos no rigidizados de ancho geométrico igual a la mitad del ancho del elemento original menos el ancho del agujero, obteniendo con franjas iguales a cada lado del agujero como si no estuviera rigidizado.

Los anteriores enfoques están reservados para específicas y limitadas configuraciones, ver **Figura 2-21** y Tabla 2-6, que usualmente no son similares con las configuraciones encontradas en los perfiles utilizados en estantería, pero permiten explorar opciones para su inclusión en la estimación de carga

Tabla 2-6. Requisitos de uso de NSR-10 para agujeros y su comparación con perfiles de uso en estanterías. Fte. [80] adaptado por Autor.

Parámetro de validación	Límites para agujeros circulares	Límites para agujeros no circulares	Valores comunes en estanterías[66]
Relación diámetro del agujero/ ancho del elemento	≥ 0 ≤ 0.5	Ancho del agujero/ Ancho con dobles ≤ 0.5	≥ 0.06 ≤ 0.6
Relación ancho del elemento/espesor	≤ 70		≤ 90
Distancia entre centros de agujeros	≥ 0.5 veces el ancho del elemento ≥ 3 veces el diámetro del agujero	≥ 610 mm	≥ 51 mm
Distancia libre entre agujeros y extremo o punto de apoyo		≥ 254 mm	≤ 76 mm
Ancho del agujero medido en la dirección del ancho del elemento		≤ 63.5 mm	≥ 6 ≤ 40
Longitud del agujero medido en la dirección perpendicular al ancho del elemento		≤ 114 mm	≥ 6 ≤ 40
Numero de filas de agujeros	1	1	1, 2 o 3

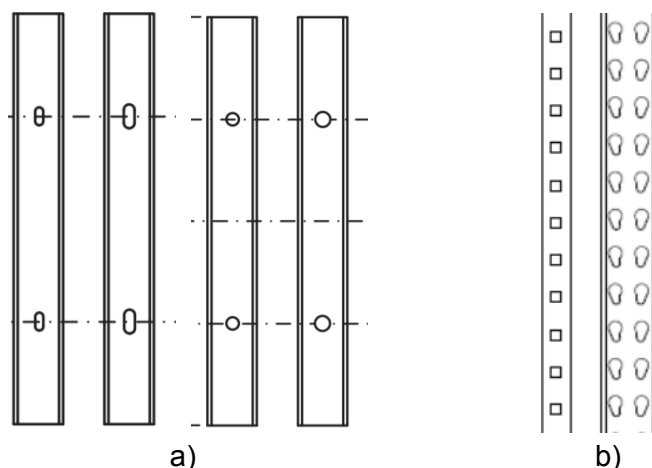
Diversos estudios se han realizado para identificar el efecto de las perforaciones en la capacidad de carga de los perfiles usados en estantería y la mayoría a estado enfocado a determinar una forma de ajustar el concepto de ancho efectivo del elemento, otros relacionados con el espesor del elemento que contiene las perforaciones y otros a determinar experimentalmente la modificación de capacidad de carga ante la presencia o no de agujeros en elemento del perfil estudiado.

En 1997, Davies et al [5], proponen un forma de tener en cuenta las perforaciones, realizando un ajuste al elemento que tiene perforaciones reemplazando su espesor real por un espesor reducido y concibiéndolo sin perforaciones. A este modelo se le conoce como espesor reducido y es aplicado a todo el ancho de elemento que tiene las perforaciones.

Otros autores con el fin de determinar la afectación en la resistencia en la capacidad de carga de elementos con agujeros tanto circulares, cómo no circulares, han desarrollado experimentos generando relaciones entre el ancho de elementos, el tamaño tanto largo

cómo ancho de los agujeros, el espaciado entre ellos y el espesor del material [21]. Se ha demostrado que la presencia de agujeros afecta la carga de pandeo elástica y el coeficiente relacionado con este.

Figura 2-21: Comparación entre agujeros. a) Agujeros acordes a NSR-10 [42]. b) Agujeros usados en estanterías. Fte. Autor y [93].



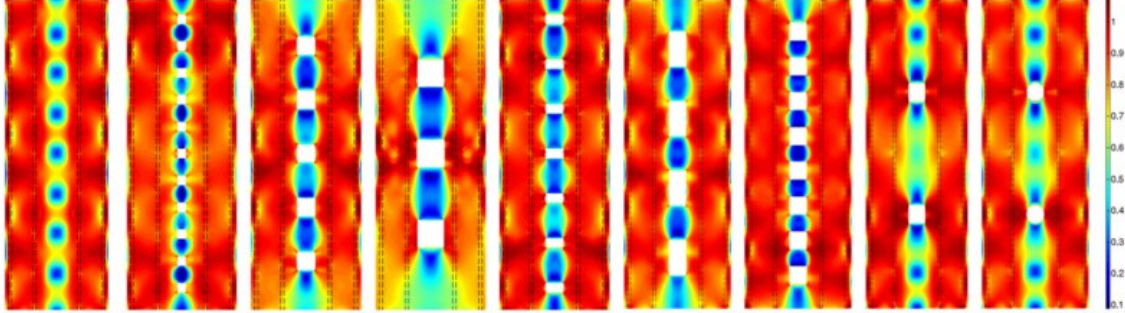
En [20] se relacionan la capacidad de carga de una sección completa con perforaciones y una sección sin perforaciones obteniendo una relación de reducción de carga que permite caracterizar la sección, encontrando que esta reducción de capacidad de carga varía de acuerdo a longitud del elemento analizado y relacionándose muy directamente con el tipo de pandeo (local, distorsional o global).

Las anteriores investigaciones permiten evidenciar que la capacidad de carga de un perfil en la zona de agujeros es completamente diferente a la sección donde no hay agujeros. En la **Figura 2-22** se puede evidenciar que longitudinalmente hay una pérdida completa de capacidad de carga en el ancho del elemento que contiene el agujero. Adicionalmente, esta pérdida de capacidad de carga afecta a las zonas adyacentes disminuyendo también la capacidad de carga y alejando el comportamiento del elemento completo como un elemento completamente rigidizado.

Lo anterior, permite concebir el elemento en tres zonas: dos laterales que se pueden tomar en el caso extremo como no rigidizadas y una zona central (según el ancho del agujero) que no tiene capacidad portante. Esta concepción fue también tomada en cuenta por Pu [54] que realizó observaciones en perfiles con dos hileras de agujeros y propuso una metodología para calcular el ancho efectivo del elemento central, llamándolo “columna central”, donde se estima el ancho efectivo, teniendo en cuenta el apoyo lateral que tiene por la discontinuidad ocasionada por los agujeros. En esa metodología se utilizan regresiones desde experimentos para determinar la relación entre la diferencia en

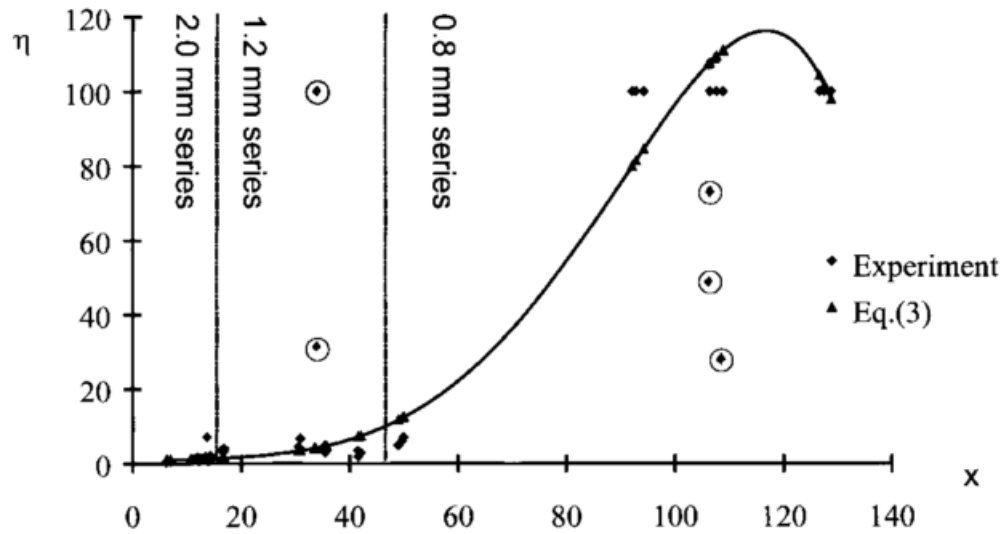
capacidad de carga del perfil teniendo en cuenta el cálculo del ancho efectivo del perfil sin la columna central y la capacidad de carga experimental de toda la sección.

Figura 2-22: Esfuerzos normalizados en elemento rigidizado con agujeros de diferentes tamaños y configuraciones [25].



Se adopta esta metodología por ser la que, desde las referencias [25], más se acerca al objeto de utilizar el método de anchos efectivos para tener en cuenta los agujeros y laterales para su efecto central. El método se implementó obteniendo resultados más cercanos respecto a los ensayos, que aquellos en los que solo ignoró la columna central.

Figura 2-23: Correlación en entre x y η [54]



Para utilizar la metodología se utilizaron las ecuaciones 2-21 a 2-25.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_y} = \frac{1}{2} \left[1 + (1 + \eta) \frac{\sigma_E}{\sigma_y} \right] - \sqrt{\frac{1}{4} \left[1 + (1 + \eta) \frac{\sigma_E}{\sigma_y} \right]^2 - \frac{\sigma_E}{\sigma_y}} \quad (2-21)$$

Con 2-21 se calcula el ancho efectivo del tramo central de la columna. Con 2-22 se calcula la carga crítica de acuerdo con la longitud de los agujeros.

$$\sigma_E = \frac{\pi^2 E t^2}{12 L_h^2 (1 - \nu^2)} \quad (2-22)$$

Con 2-23 a 2-25 se calcula β_1 , que es la Esbeltez del alma y β que es la Esbeltez de la zona central de la columna y teniendo en cuenta que, X_h , es el Ancho de la columna central. Con los valores de x se obtiene el valor de η consultando la gráfica de la referencia, aquí vinculada a la **Figura 2-23**.

$$\beta = \left(\frac{X_h}{t}\right) \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2-23)$$

$$\beta_1 = \left(\frac{W_1}{t}\right) \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2-24)$$

$$x = \beta \left(\frac{X_h}{t}\right) \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \quad (2-25)$$

Con lo anterior se puede calcular el ancho efectivo del elemento de forma general utilizando la ecuación NSR-10 F4.2.2.1.d

2.6.4 Proceso iterativo para el diseño de la sección

El cálculo de la capacidad portante de un perfil de lámina delgada consiste en calcular para la geometría y el material respectivo, el área efectiva de acuerdo con los métodos previstos anteriormente, que se presentan en resumen en la **Figura 2-24**. Un paso intermedio es la estimación de la capacidad modificada carga por el efecto del trabajo en frío en los dobleces. Es común en procesos de diseño no tener en cuenta este cálculo. En la herramienta desarrollada para el cálculo, ver [Anexo C](#), se tiene cómo opcional calcular o no este ajuste. También si se tiene en cuenta, el efecto de alivio térmico por la soldadura, comentada en la sección 2.3.2, puede omitirse este cálculo.

Una vez obtenida el área efectiva y se verifica que el centroide no se modifique sustancialmente y se procede a calcular la resistencia a la compresión del perfil, como el menor valor de la resistencia por fluencia, pandeo global, pandeo flexionante, pandeo flexotorsional, pandeo torsional y pandeo distorsional.

El desarrollo del procedimiento descrito anteriormente involucra varias sub-rutinas que se han separado principalmente para mejorar la comprensión del lector. Inicialmente se realiza una colección de información y una adaptación del modelo geométrico. Luego se realiza el cálculo del área efectiva de acuerdo a los requerimientos de NSR como se muestra en la **Figura 2-25**.

Al calcular el área geométrica del perfil, se hará de acuerdo al procedimiento estandar para perfiles de lámina delgada, en el cual se calculan los anchos efectivos de cada cara plana y se suman con las áreas de las esquinas, todo lo anterior teniendo en cuenta el valor calculado del esfuerzo de fluencia modificado.

Figura 2-24: Diagrama de flujo de Diseño Perfil con trabajo en Frío a Compresión (Adaptado por autor de AISI D101-09)[94].

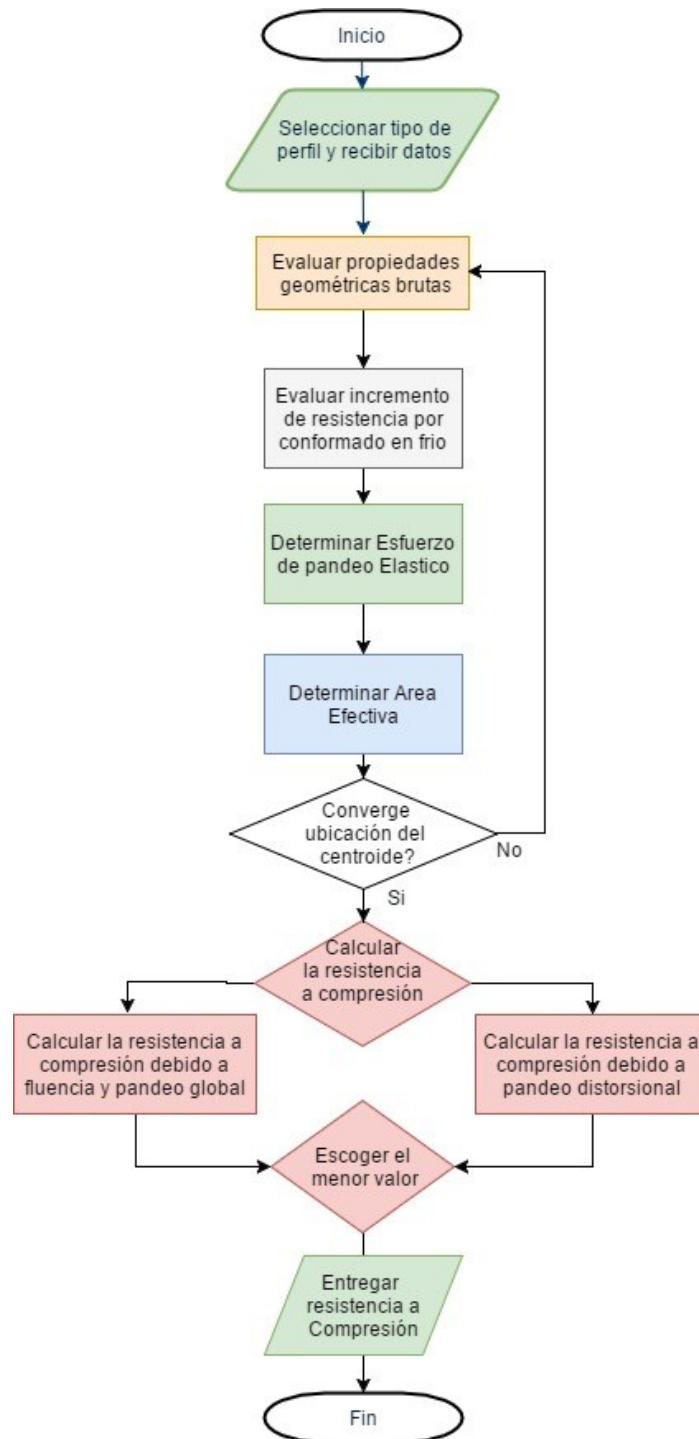
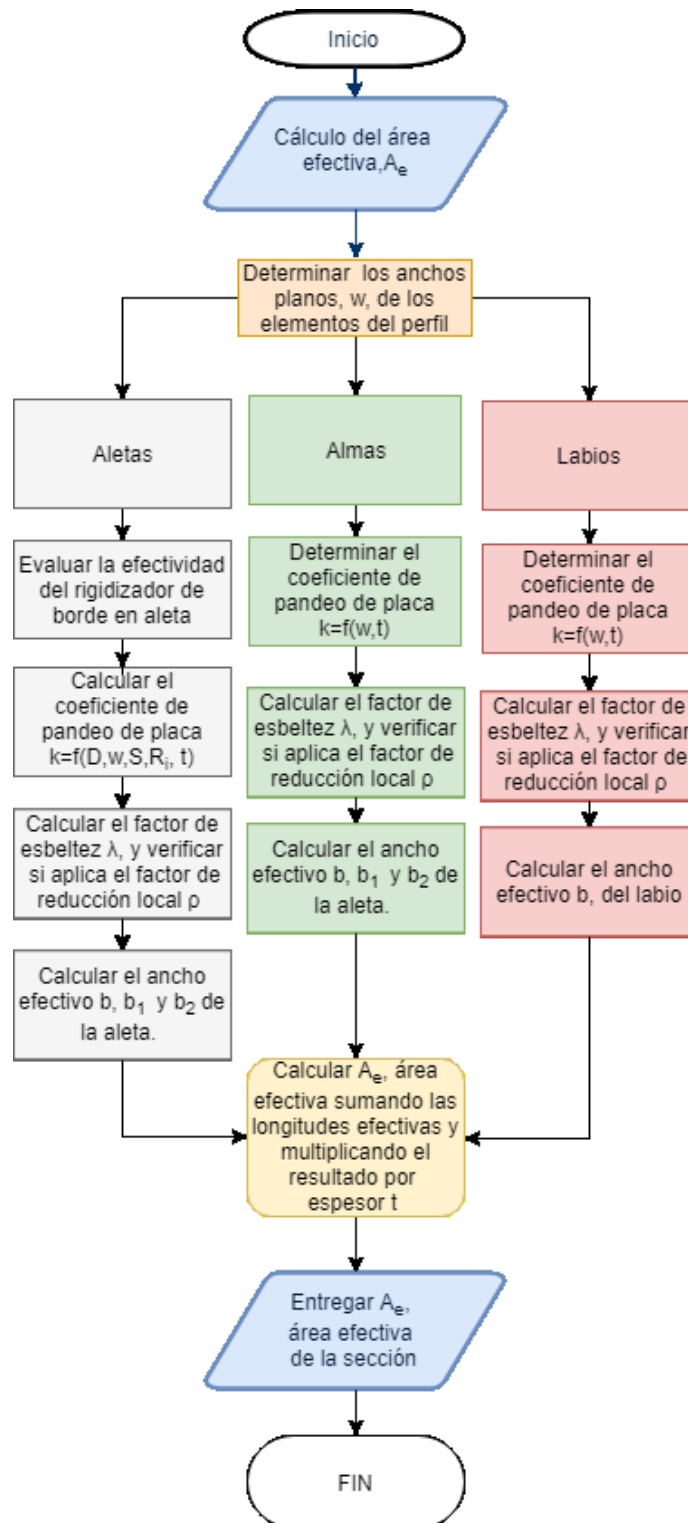


Figura 2-25: Diagrama de flujo del cálculo de área efectiva para un perfil estándar Diseño Perfil con trabajo en Frío a Compresión (Adaptado por autor de AISI D101-09)[94].



2.6.5 Desplazamiento del eje neutro

El centroide de un perfil calculado con la sección bruta se modifica al aplicarse carga y calcular el área efectiva, ver **Figura 2-26**. Varios autores [46, 95, 96] han realizado el análisis del desplazamiento del centroide, encontrando que las condiciones de cálculo actual generan perfiles más grandes en sección y que en general se excede las solicitaciones de los estándares.

Figura 2-26: Movimiento del centroide de una sección sujeta a compresión [96]. a) centroide geométrico; b) Centroide al momento del pandeo; c) centroide del área efectiva.

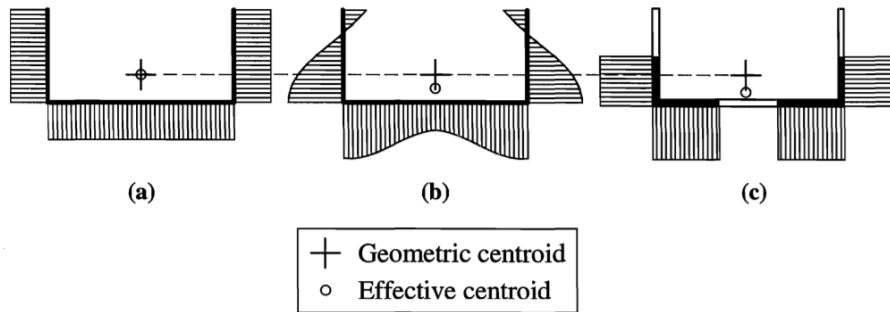
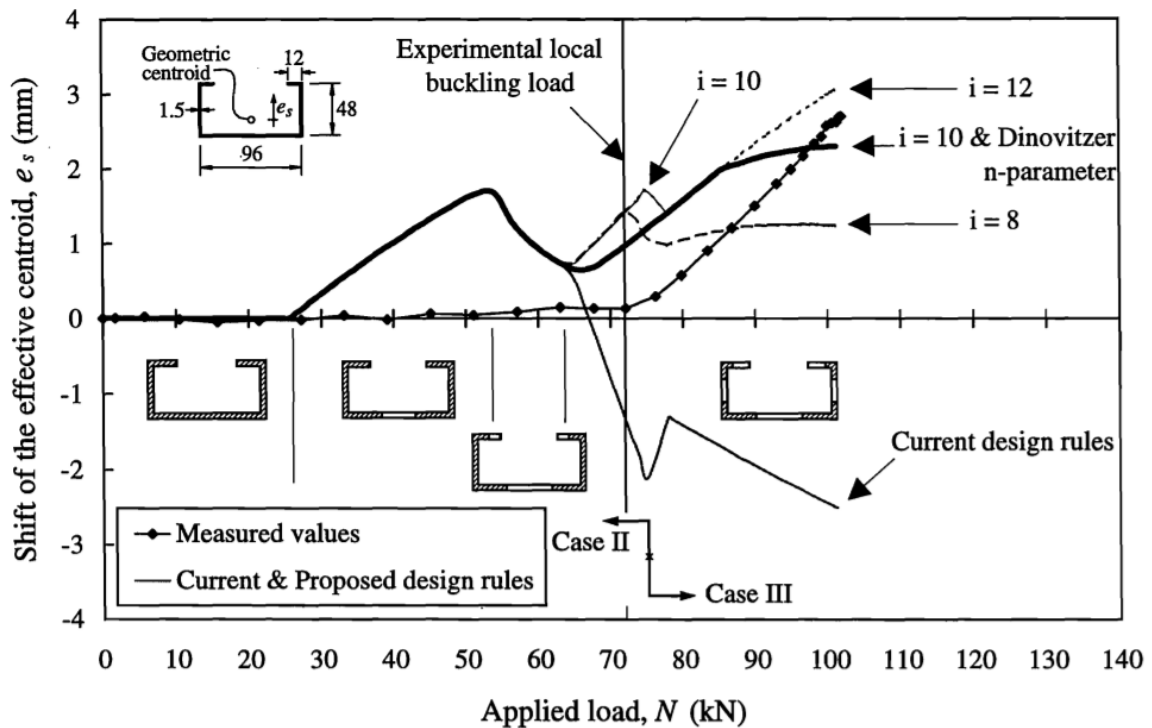


Figura 2-27: Evolución del ancho efectivo con el aumento de carga para un perfil C [96]



Desde el punto de vista de diseño implementar el cálculo del desplazamiento del centroide generaría un perfil que soporta un porcentaje mayor de carga, ver **Figura 2-27**. Este ajuste está implementado en el Eurocódigo 3, pero para AISI-100 y su norma derivada NSR-10

no está definido. Este efecto se tiene en cuenta en el modelo desarrollado por el autor, permitiendo actualizar para los diferentes estados de carga la posición del centroide de acuerdo con el área efectiva del respectivo estado. Ver [Anexo C](#).

3 MODELOS PROPUESTOS PARA LA CONSIDERACIÓN DEL REFUERZO

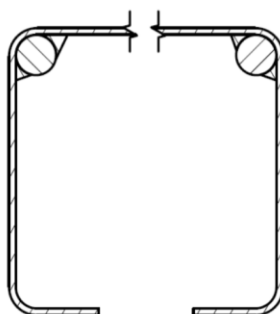
3.1 Efecto del refuerzo con barras

El refuerzo de perfiles de lámina delgada es una técnica que no está contemplada en las normas actuales de diseño y su uso no se encuentra referencias en la literatura técnica. Sin embargo, el uso de barras para aumentar la capacidad portante de perfiles de estantería es una práctica que en nuestro medio va tomando auge, razón por la cual es necesario investigar su comportamiento y plantear directrices para el diseño.

El concepto de reforzamiento de perfiles de lámina delgada está más relacionada con el uso de materiales compuestos de matrices poliméricas con fibras de diferentes tipos (fibras de virio, fibras de carbono, etc.) [97] y refuerzo con secciones pequeñas en perfiles de lámina delgada con grandes agujeros [69] y [30]. En las búsquedas realizadas (ver **Consulta bibliográfica**) no hay referencia del reforzamiento de perfiles de lámina delgada con barras de acero.

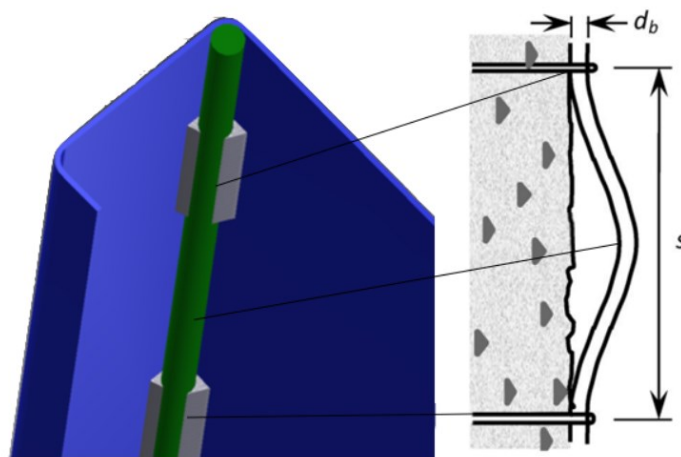
En la revisión de la técnica local, y uno de los motivadores de la realización de este trabajo, se encontró que en diferentes espacios industriales del país donde se utilizan perfiles de lámina delgada se utiliza el refuerzo con barras de acero para aumentar la capacidad de carga del perfil utilizado con algunas ventajas, como: practicidad para instalarse, costo del material y la posibilidad de no interferencia geométrica, permitiendo la utilización de la misma sección, como en la **Figura 3-1**.

Figura 3-1: Perfil en C reforzado con barras. Se muestra las barras de refuerzo y las soldaduras.



Para abordar el problema se investigó en la NSR-10 y en otras [75, 98](AISI100 y EN1993 EC3-1) en que forma la normativa existente puede ser utilizada para considerar el efecto del refuerzo. El fenómeno de pandeo de la barra de refuerzo se presenta también en elementos de concreto reforzado cuando está expuesto por diferentes razones, tal como se indicó en la **Figura 2-9** de la referencia [77], donde se aprecia que el efecto de los flejes de acero, definen la longitud y forma de pandeo. Para el caso del reforzamiento de perfiles de lámina delgada mediante barras de acero, su longitud y forma de pandeo, estará dada por la distancia libre entre los extremos de los cordones de soldadura que la conectan con el perfil, como se muestra en la **Figura 3-2**.

Figura 3-2: Perfil reforzado con barras. Izquierda: Esquema 3D con representación de soldaduras. Derecha: sección esquemática del perfil con refuerzo.



Las opciones encontradas en la NSR-10 que permitirían incluir el efecto del refuerzo en la capacidad de carga del perfil reforzado están relacionadas con:

- La posibilidad de tener en cuenta los dobleces, de mucha menor área respecto al resto de la sección,
- la consideración del aumento del esfuerzo de fluencia por el efecto del trabajo en frío en los dobleces y,
- la modificación del ancho y espesor efectivo de los elementos que componen la sección,
- y la ubicación preferente de las barras cercanas a los dobleces del alma.

De lo anterior, se pueden tener como opciones modificaciones tanto de las propiedades del material como de la geometría nominal, con el fin de involucrar el refuerzo en la determinación de la capacidad portante de la sección.

A partir de las consideraciones anteriores, el autor sugiere los siguientes modelos para abordar la problemática de cómo tener en cuenta el refuerzo en la capacidad portante del perfil. En Cualquiera de los casos propuestos se asume que la barra de acero no se pandea mientras soporta carga, condición que se cumple mientras la barra no supere el valor del

esfuerzo crítico de pandeo y las condiciones geométricas requeridas para eso de acuerdo con lo revisado en la sección 2.3.1, de esa forma se requiere la ubicación de elementos de unión espaciados a una distancia menor a la distancia crítica de pandeo. Dichos elementos de unión pueden ser soldaduras intermitentes o soldadura continua de tamaño menor. Mientras se cumpla este criterio se puede suponer la acción conjunta del dobléz y la barra de refuerzo.

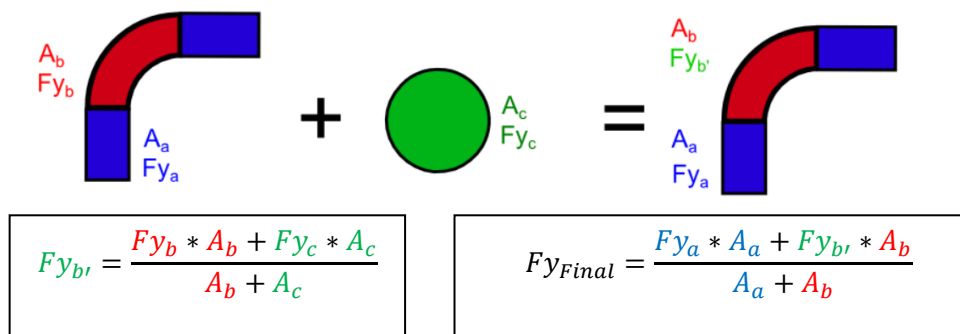
3.2 Modificación del esfuerzo de fluencia de los dobleces

La NSR-10, F.4.1.6.2 permite calcular el incremento del esfuerzo de fluencia del perfil debido al trabajo en frío en los dobleces, al incluir de forma ponderada en el cálculo y respecto al área, el esfuerzo de fluencia de la zona del dobléz que normalmente es mayor debido al trabajo en frío.

Debido a que el refuerzo se ubicará en los dobleces del alma y considerando esta disposición de la NSR-10 se sugiere obtener el esfuerzo de fluencia para los dobleces a partir de las áreas ponderadas de refuerzo y dobléz, como se muestra en la **Figura 3-3**.

Esto se hace realizando un cálculo previo, donde se obtiene inicialmente el esfuerzo de fluencia por el conformado en frío en el dobléz y su respectiva área limitada por los bordes externos del material y las líneas perpendiculares que limitan el inicio y el final de la zona curvada en el material (en rojo) según la **Figura 3-3**. Por otro lado, se estima el área neta del refuerzo (verde) y su esfuerzo de fluencia. Estos valores se ponderan respecto a las áreas y se obtiene un esfuerzo de fluencia para la zona del dobléz. Este esfuerzo de fluencia modificado se utiliza de acuerdo con la norma de forma ponderada respecto al área del perfil, logrando obtener un esfuerzo de fluencia para todo el perfil que incluye el efecto del refuerzo, el trabajo en frío en el dobléz y las propiedades del material original.

Figura 3-3: Estimación de la modificación del esfuerzo de fluencia por trabajo en frío debido al refuerzo.



$$Fy_{b'} = \frac{Fy_b * A_b + Fy_c * A_c}{A_b + A_c}$$

$$Fy_{Final} = \frac{Fy_a * A_a + Fy_{b'} * A_b}{A_a + A_b}$$

Al calcular el área geométrica del perfil, no habrá variación en las propiedades de la sección debido a que se utilizará la misma área que la del perfil original y solo se modificarán las propiedades del material.

Para realizar una mejor comprensión se mostrará la comparación de las propiedades del perfil sin refuerzo y del modelo específico presentado en la **Tabla 3-1** para refuerzo con dos barras de 9 mm, usando el software Inventor y verificando con el Manual de diseño de AISI [99].

Tabla 3-1. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo con Modificación del esfuerzo de fluencia de los dobleces. Fte Autor.

Propiedad	Perfil sin refuerzo	Modelo con esfuerzo de fluencia de los dobleces, 2 barras de 9 mm
Espesor (mm)	1.5	1.5
Área (mm ²)	569	569
Centroide x (mm)*	15.5	15.5
Centroide y (mm)**	114.3	114.3
Inercia Cent XX (mm ⁴)	290925	290925
Inercia Cent YY (mm ⁴)	4292416	4292416
F _y virgen (MPa)	257	257
F _y Acero Refuerzo	-	400
F _y final (MPa)	268	309
F _u virgen	350	350

*Medido en la dirección del eje de simetría del perfil desde el borde exterior del perfil al centroide

**Medido en la dirección del eje de no simetría del perfil desde el borde exterior del perfil al centroide

Una vez se calcule el ancho efectivo de las caras planas que depende del esfuerzo de fluencia, el área del perfil puede como máximo ser el mismo del perfil original sin refuerzo. Si los anchos efectivos se modifican, consecuentemente se modificarán el área efectiva, el centroide y las inercias efectivas del perfil.

3.3 Distribución del área del refuerzo en todos los elementos del perfil

Considerando que el área de las barras de refuerzo representa un incremento para el área del perfil, se sugiere distribuir el área de las barras de refuerzo en todos los elementos del perfil aumentando el espesor uniformemente, ver **Figura 3-4**. Para realizar esta distribución, se calcula el área neta del refuerzo, y se distribuye en todo el perfil, aumentando el espesor neto en una magnitud equivalente a la relación entre área del refuerzo y la longitud de la línea media del desarrollo del perfil. Lo anterior genera un espesor modificado, t_m , que permite realizar los cálculos del perfil según la norma. Adicionalmente se realiza la ponderación del esfuerzo de fluencia presentada en el modelo anterior con respecto a las áreas totales del perfil y del refuerzo.

Al calcular el área geométrica de la sección, esta se modificará de acuerdo con la sección del refuerzo y su repartición homogénea en la longitud del perfil. Según lo anterior, el

centroide no se afectará sustancialmente, pero la inercia se modifica al aumentar el área de la sección, ver **Tabla 3-2**. Al tener en cuenta la distribución homogénea del perfil, el esfuerzo de fluencia se vera afectado de acuerdo a la relación entre el área total del refuerzo y el área del perfil sin refuerzo.

Figura 3-4: Representación de la modificación del espesor uniforme en todo el perfil por la inclusión del refuerzo.

$$t_m = t + \frac{A_c}{\text{longitud de desarrollo del perfil}}$$

$$F_{y_{a'}} = \frac{F_{y_a} * A_a + F_{y_b} * A_b + F_{y_c} * A_c}{A_a + A_b + A_c}$$

Tabla 3-2. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo de distribución del área del refuerzo en todos los elementos del perfil. Fte Autor.

Propiedad	Perfil sin refuerzo	Modelo de distribución del área del refuerzo en todos los elementos del perfil, 2 barras de 9 mm
Espesor (mm)	1.5	1.87
Área (mm ²)	569	711
Centroide x (mm)*	15.5	16.4
Centroide y (mm)**	114.4	114.6
Inercia Cent XX (mm ⁴)	290925	363481
Inercia Cent YY (mm ⁴)	4292416	5357131
F _y material (MPa)	257	257
F _y final (MPa)	268	294

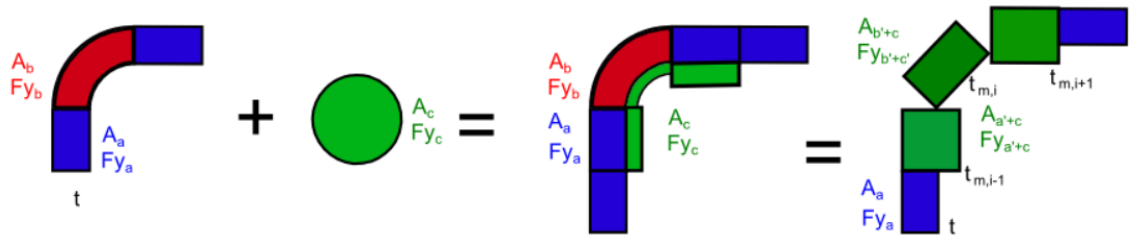
*Medido en la dirección del eje de simetría del perfil desde el borde exterior del perfil al centroide

**Medido en la dirección del eje de no simetría del perfil desde el borde exterior del perfil al centroide

3.4 Distribución del área del refuerzo en los elementos adyacentes

Considerando que el área de las barras de refuerzo afecta directamente el comportamiento de los elementos adyacentes, el autor sugiere distribuir el área de las barras de refuerzo únicamente en los elementos adyacentes a la ubicación del refuerzo. Dichos elementos adyacentes pueden ser, con los que entra en contacto la barra de acuerdo con el método de unión especificado. Como criterio importante se hace relevante el hecho de poder calcular la capacidad de carga de acuerdo con la norma NSR-10 actual, es necesaria la modificación uniforme de los elementos planos adyacentes en todo su ancho, ver **Figura 3-5**.

Figura 3-5: Representación de la modificación del espesor en elementos adyacentes a la inclusión del refuerzo. En este caso, los elementos no adyacentes pueden ser o no otros dobleces o elementos planos.



De acuerdo con lo anterior y como uno de los principales criterios a la hora de evaluar un modelo representativo de una sección es que mantenga la ubicación de su centroide y mantener su inercia original se propone modificar el espesor de los elementos adyacentes de tal forma que se mantenga su centroide. Para tal fin es necesario realizar los cálculos previos del centroide del perfil reforzado (C_{xR} , C_{yR}) con el fin de buscar que, modificando el espesor de los elementos adyacentes al refuerzo, se pueda mantener el centroide original del perfil.

Para calcular el centroide con refuerzo (C_{xR} , C_{yR}) y momento de inercia del perfil con refuerzo (I_{xxR} , I_{yyR}), se recurre a suponer que el perfil está compuesto por elementos línea lo cual permite calcular fácilmente estas propiedades de la sección, y se incluye la geometría del refuerzo, en este caso las circunferencias correspondientes.

Se tratará la sección como un conjunto sucesivo de elementos planos y curvos y para eso se busca ahora modificar el espesor de los perfiles adyacentes al refuerzo, sin que se modifique el centroide. Se procede de la siguiente forma:

1. Las variables son el espesor de los elementos adyacentes.
2. Se igualan los valores del centroide del modelo C_{xM} y C_{yM} con los del perfil reforzado ($C_{xR}=C_{xM}$; $C_{yR}=C_{yM}$; $C_{xM}=f(t_{m,i-1}; t_{m,i}; t_{m,i+1})$; $C_{yM}=f(t_{m,i-1}; t_{m,i}; t_{m,i+1})$).
3. Dado que, si se tiene un perfil simétrico en un eje, con dos refuerzos simétricos, y se supone que el valor de $t_{m,i}$ (espesor en las esquinas entre alma y flange) es el promedio entre los espesores adyacentes ($t_{m,i}=(t_{m,i-1} + t_{m,i+1})/2$),

4. Como solo existen dos incógnitas, se resuelven al calcular el centroide y realizar una búsqueda de soluciones, en este caso con el Solver de hoja de cálculo de Excel, con restricciones del área y el centroide, variando los espesores del flange y alma, ver .
5. .
6. Si se mantienen iguales los espesores en los elementos adyacentes antes y después del refuerzo es posible que no pueda mantenerse el centroide del perfil reforzado y del modelo.

Tabla 3-3. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo de Distribución del área del refuerzo en todos los elementos del perfil. Fte Autor.

Propiedad	Perfil sin refuerzo	Perfil con refuerzo $F_y=400\text{MPa}$	Modelo de distribución del área del refuerzo en los elementos adyacentes del perfil, 2 barras de 9 mm
Espesor (mm)	1.5	1.5	
Espesor labio	1.5	1.5	1.67 en flange 1.5 labio
Espesor alma	1.5	1.5	2.0 en alma
Espesor aleta	1.5	1.5	1.67 en flange
Área (mm^2)	569	711	711
Centroide x (mm)*	15.5	14.3	14.3
Centroide y (mm)**	114.3	114.3	114.3
Inercia Cent XX (mm^4)	290925	304061	330466
Inercia Cent YY (mm^4)	4292416	5957186	5216146
F_y material (MPa)	257	257	257
F_y final (MPa)	268	288	288

*Medido en la dirección del eje de simetría del perfil desde el borde exterior del perfil al centroide

**Medido en la dirección del eje de no simetría del perfil desde el borde exterior del perfil al centroide

Al calcular el área geométrica de la sección, esta se modificará de acuerdo con la sección del refuerzo. Se mantiene el área de la sección con el refuerzo y la ubicación del centroide como se puede ver en la **Tabla 3-3**. Se modifica el momento de inercia y se ajusta el esfuerzo de fluencia por la respectiva modificación de áreas. Este procedimiento requiere mucho tiempo debido a los diversos pasos que son necesarios para obtener el modelo geométrico.

3.5 Concentración del área del refuerzo en el doblez

Una observación más detallada de la sección reforzada permite establecer que las barras de refuerzo tienen una influencia dominante sobre los dobleces únicamente. Por este motivo y considerando que el perfil debe conservar su carácter de lámina delgada, el autor sugiere concentrar el área del refuerzo en los dobleces correspondientes ver **Figura 3-7**.

Figura 3-6: Representación del ejemplo de la modificación del espesor en elementos adyacentes a la inclusión del refuerzo. Horizontal: flange, Vertical: alma.

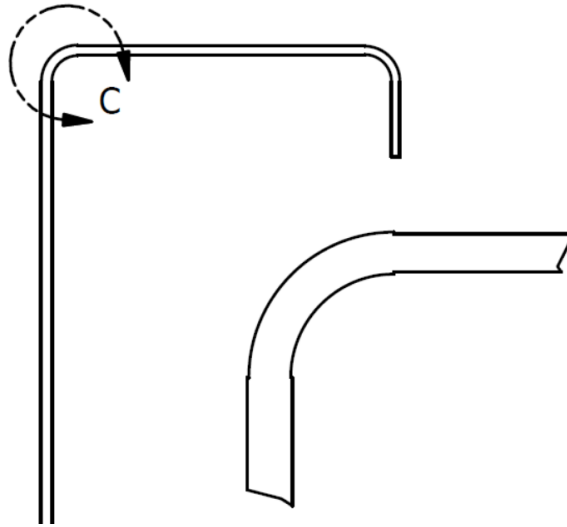
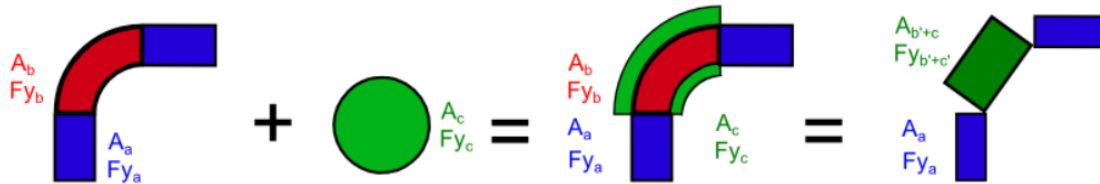


Figura 3-7: Representación de la inclusión del refuerzo por medio de la modificación del doblez y representación como lámina delgada.



Según lo anterior y como uno de los principales criterios a la hora de evaluar un modelo representativo de una sección es que mantenga la ubicación de su centroide y mantener su inercia original se propone modificar el espesor de los elementos adyacentes de tal forma que se mantenga su centroide. Para tal fin es necesario realizar los cálculos previos del centroide del perfil reforzado (C_{xR} , C_{yR}) con el fin de buscar que, modificando el espesor de los elementos adyacentes al refuerzo, se pueda mantener el centroide original del perfil.

Para calcular el centroide con refuerzo (C_{xR} , C_{yR}) y momento de inercia del perfil con refuerzo (I_{xxR} , I_{yyR}), se recurre a suponer que el perfil está compuesto por elementos línea lo cual permite calcular fácilmente estas propiedades de la sección, y se incluye la geometría del refuerzo, en este caso las circunferencias correspondientes.

Figura 3-8: Representación del ejemplo de la modificación del espesor en la esquina debido a la inclusión del refuerzo, y la conservación del centro de gravedad en la zona del refuerzo.

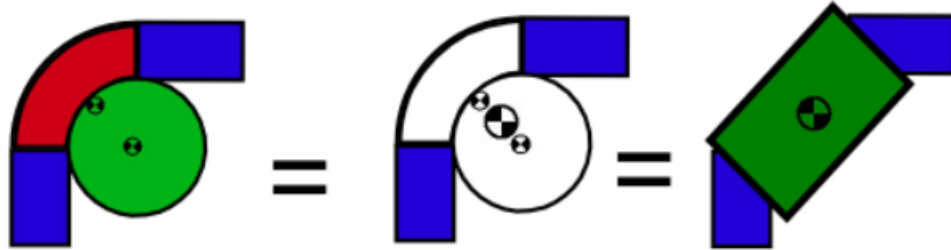


Tabla 3-4. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo de Concentración del área del refuerzo en el doblez. Fte Autor.

Propiedad	Perfil sin refuerzo	Perfil con refuerzo $F_y=400\text{MPa}$	Modelo de distribución del área del refuerzo en la esquina adyacente esquina curva, 2 barras de 9 mm	Modelo de distribución del área del refuerzo en la esquina adyacente esquina recta, 2 barras de 9 mm
Espesor (mm)	1.5	1.5	1.5 perfil	1.5 perfil
Espesor en doblez	1.5	1.5	6.91 mm	7.48 mm
Área (mm^2)	569	711	711	711
Centroide x (mm)*	15.5	14.3	14.3	14.3
Centroide y (mm)**	114.3	114.3	114.3	114.3
Inercia Cent XX (mm^4)	290925	304061	360321	304061
Inercia Cent YY (mm^4)	4292416	5957186	6050723	5948551
F_y material (MPa)	257	257	257	257
F_y final (MPa)	268	288	290	288

*Medido en la dirección del eje de simetría del perfil desde el borde exterior del perfil al centroide

**Medido en la dirección del eje de no simetría del perfil desde el borde exterior del perfil al centroide

Se tratará la sección cómo un conjunto sucesivo de elementos planos y curvos y para eso se busca ahora modificar el espesor del dobléz donde se ubican los refuerzos, sin que se modifique el centroide. Se procede de la siguiente forma:

1. La variable es el espesor del dobléz cercano al refuerzo.
2. Se igualan los valores del centroide del modelo C_{xM} y C_{yM} con los del perfil reforzado ($C_{xR}=C_{xM}$; $C_{yR}=C_{yM}$; $C_{xM}=f(t_{m,i}; l_{m,i})$; $C_{yM}=f(t_{m,i}; l_{m,i})$).
3. Dado que, si se tiene un perfil simétrico en un eje, con dos refuerzos simétricos, y se supone que el valor de $t_{m,i}$ (espesor en las esquinas entre alma y flange) es igual en ambas esquinas.
4. Como solo existe una incógnita, se resuelven al calcular el centroide y realizar una búsqueda de soluciones, en este caso con el Solver de hoja de cálculo de Excel, con restricciones del área y el centroide, variando los espesores de la esquina.

Se busca que mantengan el centroide local de la zona de la esquina, como se muestra en la

Figura 3-8.

3.6 Selección del modelo geométrico

Luego de realizar la presentación de los posibles modelos y realizar un ejemplo práctico de cálculo para cada uno, se procederá a analizar las ventajas y desventajas que tendría cada uno.

Se evaluarán principalmente los siguientes aspectos:

- Cambios geométricos en general de la sección
- Cambios en la ubicación del centroide
- Cambios en las propiedades inerciales
- Cambios en espesores y longitudes de elementos cercanos
- Cambios en espesores y longitudes de elementos de toda la sección
- Facilidad de cálculo
- Aproximación con la metodología de diseño para lámina delgada actual.

Analizando los modelos, en la Tabla 3-5 se presenta el resumen de ventajas y desventajas. Una vez analizados de acuerdo con los criterios mencionados, la opción de la Concentración del área del refuerzo en dobléz es la que menos afectación geométrica tiene a nivel de toda la sección, es cercana a la metodología existente por la variante de manejar el refuerzo como un elemento plano y por ende la facilidad de evaluar su capacidad portante.

De acuerdo con lo aquí planteado se desarrolló una herramienta en Matlab que permite hacer la transformación de la geometría, convirtiendo el refuerzo y el dobléz en un elemento de espesor diferente, Ver [Anexo C](#).

Tabla 3-5. Comparación propiedades perfil sin refuerzo y perfil con refuerzo según el modelo de Concentración del área del refuerzo en el dobléz. Fte Autor.

Modelo	Ventajas	Desventajas
1. Modificación del esfuerzo de fluencia de los dobleces	Centroide no cambia de posición. No se modifica el espesor de los elementos.	No tiene en cuenta el aumento del área, por el refuerzo y, por lo tanto, no representa las condiciones inerciales del perfil reforzado.
2. Distribución del área del refuerzo en todo el perfil.	Se modifican los espesores de todos los elementos de forma similar, lo cual facilita el cálculo.	Centroide cambia de posición. Se modifican las condiciones inerciales del perfil.
3. Distribución del área del refuerzo en los elementos adyacentes	Centroide puede o no cambiar de posición. Puede o no haber excesiva variación de las condiciones inerciales, debido a las variantes que se encuentran al distribuir el área del refuerzo.	Es necesario subdividir los elementos adyacentes para no modificar el centroide. O en su defecto usar espesores diferentes en los elementos adyacentes para modificar la posición del centroide. Cálculo dispendioso.
4. Concentración del área del refuerzo en el dobléz	Centroide no cambia de posición. Poca variación de las condiciones inerciales, debido a que el área de refuerzo se distribuye en el espesor del dobléz. La estimación de la capacidad portante del perfil se ajusta más al cálculo estándar de lámina delgada.	Es necesario hacer un ajuste del dobléz en longitud y espesor, previo al cálculo de las propiedades geométricas de la sección.

3.7 ¿Por qué se puede tomar el elemento esquina como rígido y es válida la teoría de lámina delgada?

En el análisis de perfiles de lámina delgada a compresión, se tienen en cuenta especialmente tres tipos de elementos como se revisó en la sección 2.6. Al realizar las respectivas verificaciones para el perfil de especial interés, el perfil C, se encuentran

especialmente los 3 tipos de elementos: rigidizado, no rigidizado y parcialmente rigidizado, ver **Figura 3-9**. Profundizando en el procedimiento de diseño, se puede evidenciar que el perfil tiene un componente adicional y es el elemento esquina, el cual se tiene en cuenta para las propiedades globales de la sección y en la capacidad de carga se toma como un elemento en el que su área aporta de forma efectiva en la capacidad de carga.

Figura 3-9: Tipo de elementos en el perfil tipo C, Fte autor.

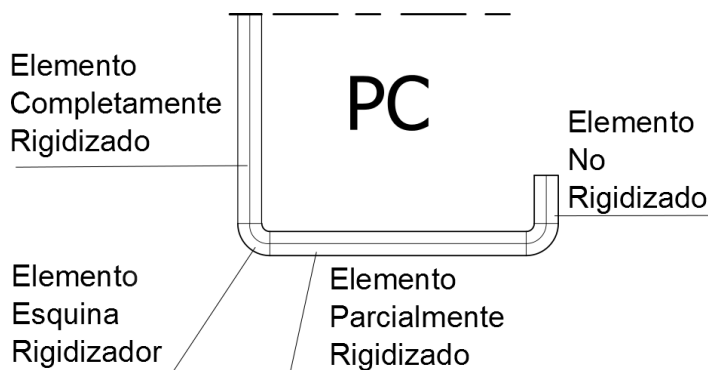
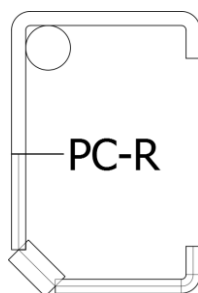


Figura 3-10: Representación simétrica del elemento esquina del perfil C, Fte autor.



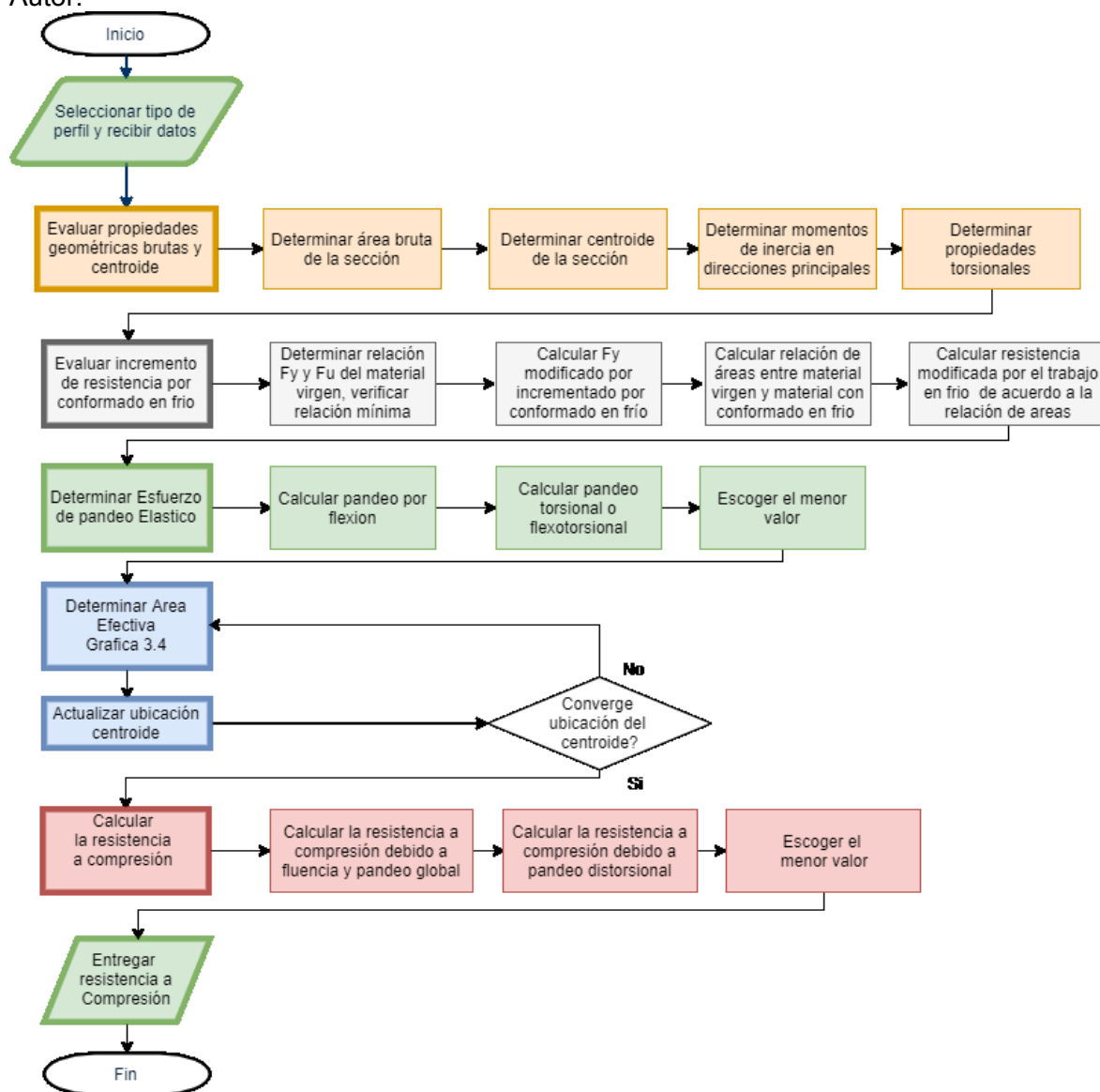
De lo anterior se deduce que el elemento esquina, y especialmente el de la unión entre la aleta y el alma es un elemento completamente rígido en sí mismo y por otro lado rigidiza los elementos conexos. Ahora en el caso que este elemento esquina fuera de mayor radio de dobléz, el aumento en radio de dobléz, disminuye el tamaño de los elementos adyacentes planos que se rigidizan pudiendo convertir este elemento curvo en varios elementos planos y con el fin de simplificar el modelo llevarlo a ser un solo elemento plano, por definición rigidizado completamente y rigidizador de los elementos conexos, modelo plasmado gráficamente en la **Figura 3-10**. Lo anterior cumpliendo los elementos básicos de la redistribución en la sección y asegurando que se mantenga el centroide del perfil.

4 MÉTODO PROPUESTO PARA LA ESTIMACIÓN DE CARGA

4.1 Filosofía de diseño a la luz de la normativa existente NSR-10. Modelo de referencia

La estimación de cargas en la normativa existente, como se revisó en el capítulo 2, está basada principalmente en la metodología del ancho efectivo. Para lo cual es necesario para una sección específica realizar el procedimiento indicado en la **Figura 4-1**.

Figura 4-1: Procedimiento para cálculo de una sección sin agujeros y sin refuerzo. Fte. Autor.



Con el fin de realizar una referencia para la estimación de cargas de perfiles reforzados con agujeros se desarrolló una herramienta de una hoja de Cálculo en Excel, ver [Anexo C](#), que permite estimar la capacidad de carga a compresión para un perfil, utilizando el procedimiento descrito anteriormente. Dicha hoja de cálculo se comparó con la literatura existente para validarla. Como referencia funcional, se realizó seguimiento sobre un perfil tipo C típico en secciones de lámina delgada estructurales, que también por su geometría puede aproximarse a las utilizadas en estanterías.

Como se mencionó anteriormente, las prescripciones de la norma NSR-10 con respecto a las perforaciones en perfiles de lámina delgada no aplican para la estimación de la carga crítica a compresión, ni tampoco existen indicaciones de cómo tratar el refuerzo.

Tabla 4-1. Descripción gráfica de los modelos estudiados. Fte Autor.

SIGLA	Secciones sin refuerzo			Secciones con refuerzo		
	PL	PC	PC-A	PL-R	PC-R	PC-A-R
Tipo de perfil						
Descripción	Sección L, con labios en las aletas	Sección C, con labios en las aletas	Sección C, con labios en las aletas y perforaciones en el alma	Sección L, con labios en las aletas y refuerzo con barras en las esquinas de coincidencia entre aleta y alma	Sección C, con labios en las aletas y refuerzo con barras en las esquinas de coincidencia entre aleta y alma	Sección C, con labios en las aletas, perforaciones en el alma y refuerzo con barras en las esquinas de coincidencia entre aleta y alma
Modelo Sección Transversal	No Aplica			No Aplica		

En las siguientes secciones se presenta la metodología propuesta tomando como referencia las indicaciones básicas de cálculo presentadas en la norma NSR-10, para los casos estudiados que se pueden apreciar en la Tabla 1-1, propuesta con la que se desarrolló la Hojas de cálculo del [Anexo C](#).

Ajuste del modelo que considera el efecto del refuerzo

Para estimar la capacidad de carga teniendo en cuenta el efecto del refuerzo, y de acuerdo con el estudio realizado en la sección 3, se implementó en el modelo numérico la inclusión del efecto del refuerzo, modificando previamente la geometría del perfil y teniendo en cuenta las variaciones por capacidad de carga de acuerdo con el material de refuerzo. Para implementar en el modelo numérico, se incluyó en el modelo de referencia un paso previo de adaptación del modelo geométrico del perfil.

En dicho paso se realiza la transición del doblez a un elemento plano y se realiza el ajuste del material del perfil de acuerdo con la estimación de aumento de carga por conformado en frío y su interacción con el material del refuerzo. Lo anterior se refleja en la inclusión de un elemento plano en la zona del doblez reforzado, ver **Figura 4-2**, y en la variación del material del perfil, todo lo anterior sin modificar el centro de gravedad del perfil y teniendo en cuenta la reducción del ancho geométrico de los elementos conexos al doblez por el efecto de la interacción de la unión entre la barra de refuerzo y los elementos mencionados. Para este ajuste se desarrolló una herramienta en MATLAB que permite calcular la geometría del perfil resultante al considerar el refuerzo, ver ANEXO C: Herramientas Desarrolladas.

Una vez realizado este preproceso, se continua con el modelo de referencia de la **Figura 4-1**, teniendo en cuenta de calcular el ancho efectivo del nuevo elemento, como se puede ver en **Figura 4-3**.

Figura 4-2: a) Sustitución del refuerzo, b) Cambio en el número de elementos del perfil y conservación del centroide. Fte. Autor.

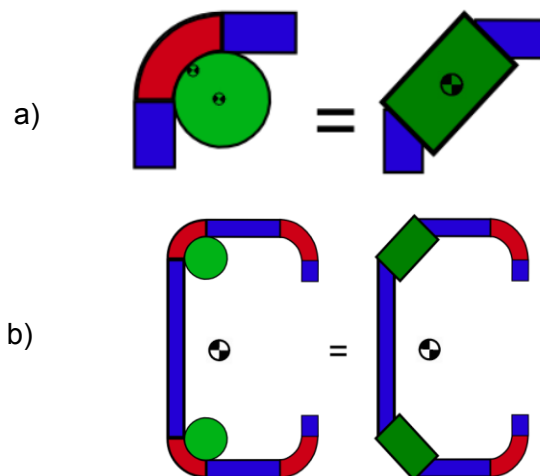
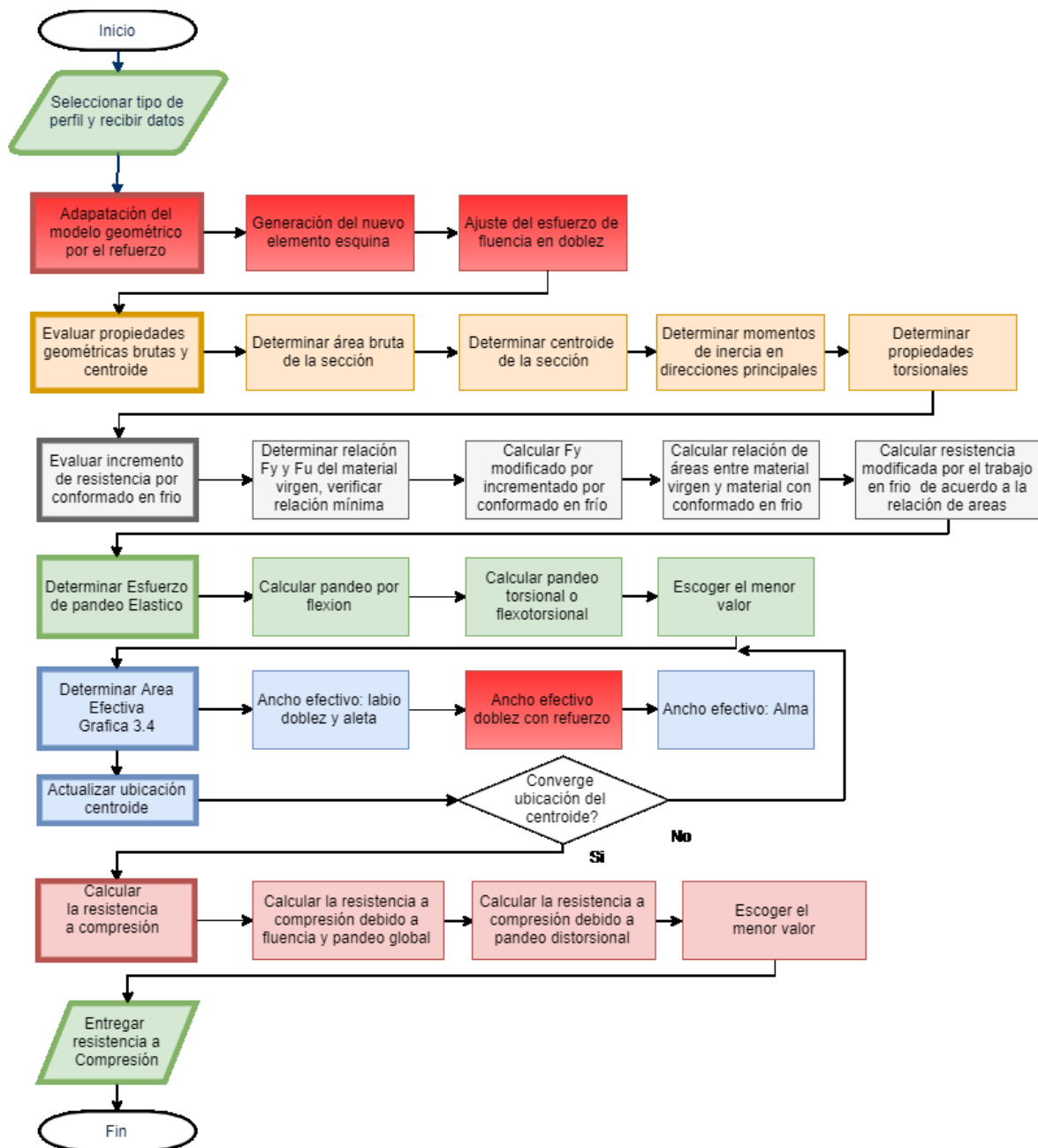


Figura 4-3: Procedimiento para cálculo de una sección sin agujeros y con refuerzo. Fte. Autor.



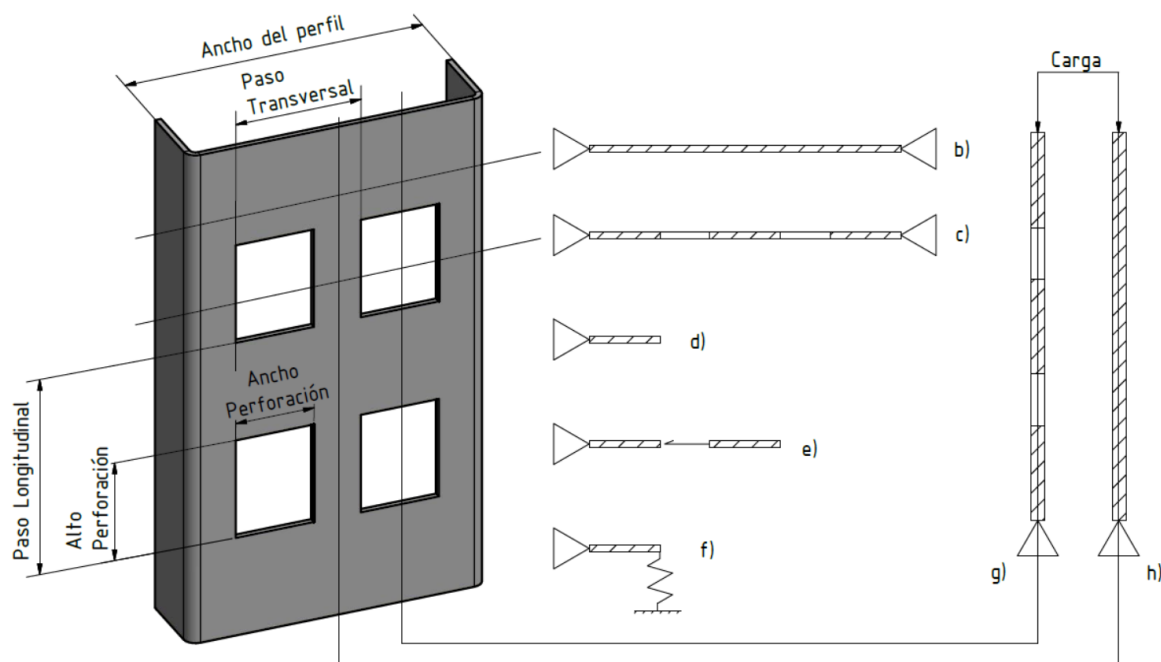
4.2 Ajuste del modelo que considera las perforaciones en los elementos del perfil

Para estimar la capacidad de carga teniendo en cuenta el efecto de las perforaciones, y de acuerdo con el estado del arte revisado en la sección 2.6.3 de este documento, se implementó en el modelo numérico la modificación de la geometría del elemento

considerando las perforaciones, y de acuerdo con la presencia o no de rigidizadores intermedios. En el modelo numérico de referencia se incluyó un paso previo de adaptación del modelo geométrico del perfil el cual considera el efecto del espaciamiento longitudinal entre centros de agujeros y el tamaño longitudinal respectivo. Esto se refleja en una modificación geométrica del perfil.

El paso de adaptación del modelo geométrico considera los elementos a cada lado de la perforación como simplemente apoyados, dependiendo de la presencia o no de rigidizadores intermedios y el número de columnas de agujeros, contados perpendicularmente a la acción de la carga.

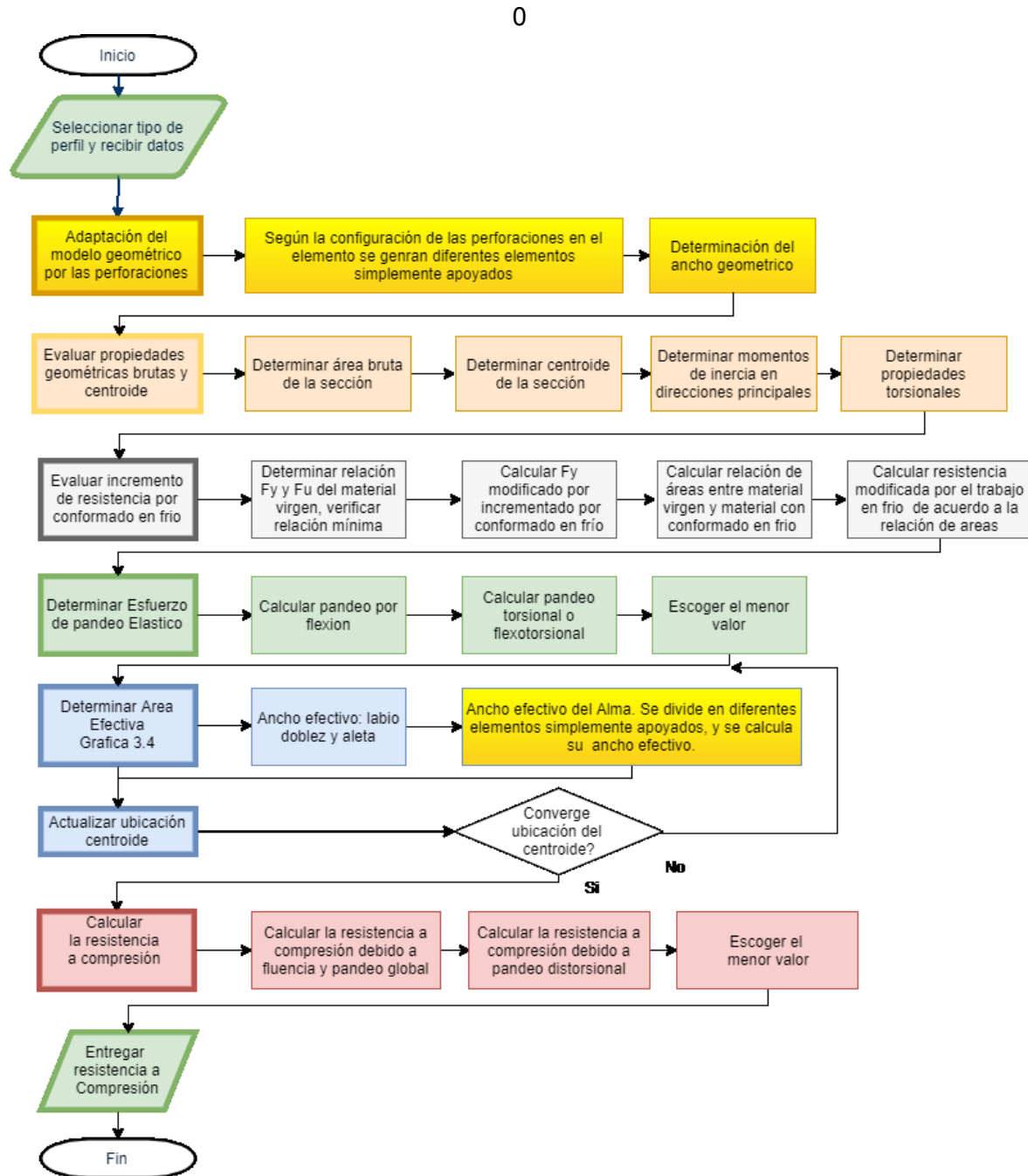
Figura 4-4: Ajuste por la presencia de perforaciones en el elemento. a) Esquema del perfil; b) Sección transversal con elemento no perforado, apoyado en ambos extremos; c) Sección transversal con elemento perforado y apoyado en ambos extremos; d) Elemento en extremo separado por la perforación; e) Influencia del elemento central sobre el elemento en extremo debido al material entre perforaciones; f) efecto del elemento central sobre el elemento en extremo debido al material entre perforaciones; g) Sección longitudinal con elemento perforado apoyado y cargado en la parte superior; h) Sección longitudinal con elemento no perforado apoyado y cargado en la parte superior. Fte. Autor.



Tomando en cuenta la anterior consideración, la configuración adoptada en este trabajo es la siguiente, según la **Figura 4-4**: a) Perfil tipo C, alma con dos columnas de perforaciones y sin rigidizador intermedio, aletas con labio y sin perforaciones. b) y c) representan la configuración de teoría de lámina delgada en las direcciones transversales sin agujeros y con agujeros, respectivamente. El efecto de las perforaciones en el alma se consideró generando en principio tres subelementos (c), de los cuales el subelemento central, según lo referenciado en el capítulo 4 de este trabajo y específicamente en [18, 21] no aporta significativamente en la capacidad de carga a compresión del elemento

modificando la configuración a elementos simplemente apoyados en un extremo (d), pero si modifica las condiciones de apoyo de los dos sub elementos extremos de acuerdo a la configuración longitudinal de las perforaciones (e) y (g).

Figura 4-5: Procedimiento para cálculo de una sección con agujeros y sin refuerzo. Fte. Autor.



Para incluir en el análisis del elemento extremo, la modificación de la condición de apoyo por las perforaciones (f), se utiliza la validación realizada en la sección 0, donde se muestra

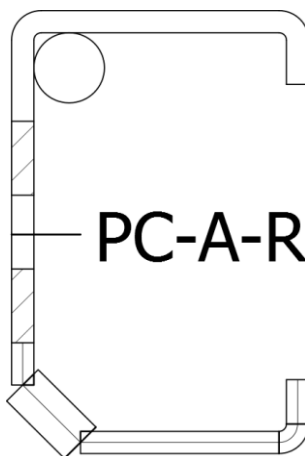
la variación del valor del coeficiente de pandeo, k , de acuerdo a variaciones de la relación entre la longitud perforada en un extremo del elemento y el paso longitudinal completamente apoyado en el otro extremo del elemento. La norma NSR-10 en F 4.2.2.1, en el procedimiento de acuerdo con el tipo de apoyo especifica el uso de un valor de k , que es máximo de 4 para elementos completamente rigidizados y mínimo de 0.43 (F 4.2.2.2) para elementos no rigidizados. Este planteamiento se muestra incluido en el modelo de referencia como se puede ver en la **Figura 4-5**, resaltado en amarillo.

4.3 Efecto del refuerzo y perforaciones en perfil tipo C

Para estimar la capacidad de carga teniendo en cuenta el efecto de las perforaciones y adicionalmente tener en cuenta el efecto del refuerzo, de acuerdo a las secciones anteriores, se configura el orden de las modificaciones realizadas al procedimiento de referencia teniendo en cuenta que se realiza inicialmente una modificación al modelo geométrico por el refuerzo debido que este ajuste modifica el ancho geométrico de los elementos adyacentes y variando el ancho geométrico de los elementos donde existan perforaciones.

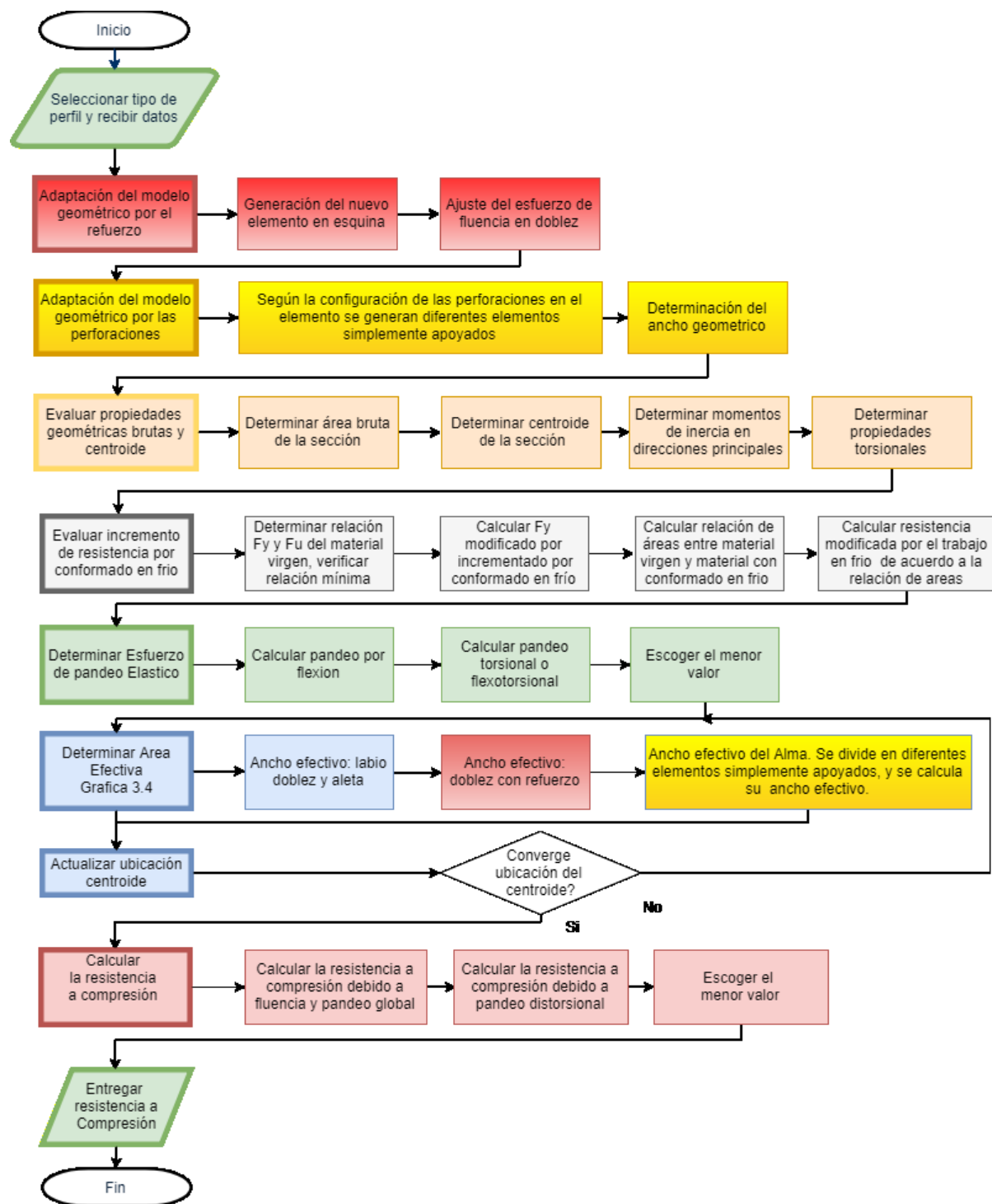
Una vez realizada la adaptación del modelo geométrico para ambos casos se procede según el procedimiento de referencia, ver **Figura 4-7**. Adicionalmente, en el cálculo del ancho efectivo se realizan las modificaciones respectivas primero al refuerzo y después al alma por las perforaciones, como se muestra en la **Figura 4-6**.

Figura 4-6: Representación del modelo final de los elementos en un perfil C reforzado con barras y con perforaciones en el alma. Fte. Autor.



De acuerdo con este procedimiento se desarrolló una hoja de cálculo para estimar la capacidad de carga en perfiles tipo C, con o sin refuerzo y con o sin agujeros; y por la disponibilidad de información para la respectiva verificación del procedimiento planteado se desarrolló una herramienta similar para perfiles en L, Ver [Anexo C](#).

Figura 4-7: Procedimiento para cálculo de una sección con agujeros y con refuerzo de barras circulares. Fte. Autor.



En la herramienta se incluyeron algunos cálculos adicionales, que el usuario puede utilizar, pero que no están validados y no son parte del alcance del presente trabajo. Entre ellos la inclusión de un tipo de unión como la soldadura, que como parte de la sección transversal

puede aportar en la capacidad portante, según sea el caso si es continua o es intermitente. Para los fines de cálculo y validación del modelo se ignoró su componente geométrico y se analizó su efecto que es el de mantener el trabajo de sección compuesta entre la lámina delgada y la barra de refuerzo. Otro elemento incluido es el cálculo de propiedades geométricas en otros modelos, tanto en la herramienta de Matlab, como en la hoja de cálculo.







5 VALIDACIÓN Y APLICACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO PROPUESTO

Este capítulo se divide en cuatro partes, en la primera parte se presenta la descripción de los instrumentos para la validación, el respectivo plan de validación y aplicación. En la segunda parte se describen los casos de validación del modelo numérico propuesto. En la tercera parte se presentan los casos de aplicación según el plan de validación, y en la cuarta parte se realiza el análisis y discusión de los resultados.

5.1 Plan de validación y aplicación

Para realizar la validación del modelo numérico propuesto se tomó como base la información referida en el estado del arte, donde se relacionan diferentes investigaciones que sirvieron como apoyo en el alcance de este trabajo. Fueron seleccionadas referencias que incluyeron en sí mismas validaciones de tres maneras: experimental, analítica y con modelos de elementos finitos en los dos tipos de perfiles de interés para este trabajo: perfiles en L y perfiles en C, con labios. En la Tabla 5-1 se presentan las referencias seleccionadas para validar el modelo numérico propuesto desarrollado en la sección anterior.

Tabla 5-1. Autores e investigaciones seleccionadas para validación y comparación. Fte Autor.

Tipo	Perfiles sin refuerzo			Perfiles con refuerzo		
	PL	PC	PC-A	PL-R	PC-R	PC-A-R
Tipo de perfil						
Referencias	2005 Young, Ben [32] 2005 Young, Ben; Ellobody E.[33]	1998 Young, Ben [40, 41] [42] 2002 Schafer, B [43]	1998 Sivakumara, K [53] 1999-Pu; Godley [54]	Kalavagunta, S [26]	2006 Sivakumaran, K [69] 2008 Young, B [27]	Sivakumaran, K [30] 2009 Acharya, S [29]

Debido a que los casos con refuerzo previstos en este estudio no están reportados en la literatura relacionada en la Tabla 5-1, se realizaron validaciones de manera similar a las reportadas en la literatura buscando calibrar las herramientas utilizadas para la validación, especialmente el modelo de elementos finitos. Las tablas resumen de los modelos de elementos finitos y CUSFM, se encuentran en el [Anexo B](#).

En la Tabla 5-2 se presenta la descripción de las diferentes herramientas de validación utilizadas; en la misma Tabla se presenta un resumen de sus características y se muestra de manera general el proceso adoptado para construir el modelo de validación.







Tabla 5-2. Descripción de las herramientas de validación utilizadas en este trabajo. Fte Autor.

Herramienta	Descripción
Literatura con: Estimación analítica, ensayos Experimentales	Experimentos realizados con perfiles de configuración similar al de estanterías y solicitados a compresión permiten comparar los resultados con los modelos desarrollados o aplicados en las respectivas investigaciones; entre otros modelos: MAE, Método de Elementos finitos
Software CUFSM-Cornell University Finite Strip Method	Método de las bandas finitas – MBF Estimación de cargas de pandeo lineales a partir del análisis por bandas finitas: <ul style="list-style-type: none"> Definición geométrica y ancho de bandas a utilizar. Análisis estático, condiciones de apoyo y carga aplicada. Determinación de la matriz de rigidez y ecuaciones de deformación y relación de deformación longitudinal y transversal Análisis de pandeo en el rango lineal, determinando los modos correspondientes a las cargas lineales para pandeo. Validación de resultados a partir de la visualización de la geometría deformada. Estimación de carga y análisis de resultados.
Software ANSYS	Método de elementos finitos – MEF-Explicito 1. Estimación de la carga de pandeo lineal para placas y perfiles utilizando la metodología de valores propios: <ul style="list-style-type: none"> Definición geométrica Análisis estático, condiciones de apoyo y carga unitaria. Determinación de la matriz de rigidez Análisis de pandeo en el rango lineal, determinando los modos correspondientes a las cargas lineales para pandeo y la geometría deformada por dichos modos. 2. Estimación de las cargas máxima en el rango no lineal. <ul style="list-style-type: none"> Uso del análisis lineal para estimar el orden de magnitud de la carga a aplicar. Inclusión de las no linealidades factorando las magnitudes de la geometría deformada del modo lineal y de acuerdo con las recomendaciones encontradas en la literatura y normativa. Generación del nuevo modelo geométrico e implementación de las no linealidades del material y condiciones de apoyo. Identificación del método de solución a utilizar. Estimación de carga y análisis de resultados.
Modelo propuesto	Método del ancho efectivo MAE. La propuesta de considerar el refuerzo externo mediante barras de acero conectadas a perfiles de lámina delgada para estanterías se realizó tomando como referencia el método MAE descrito en la NSR-10, donde la barra de refuerzo se transformó en un elemento equivalente en lámina delgada ver 3. A partir de la modificación de la sección transversal por la inclusión del efecto de las barras de refuerzo, se procedió a calcular la carga máxima a compresión.

En el anexo 10.2.1 se presentan en forma más detallada los criterios para la definición de las herramientas de validación descritas. Los casos de validación y aplicación planteados se describen en la Tabla 5-3, y como su nombre lo indica en los primeros casos se comparó y validó el modelo numérico propuesto desarrollado por el autor. En los siguientes se

aplicó la metodología propuesta para estimar la capacidad de carga de perfiles en ángulo o L reforzados con barras y perfiles C reforzados con barras con y sin perforaciones en el alma.

Tabla 5-3. Descripción casos de validación y aplicación. Fte Autor.

Instrumento	Casos de Validación			Casos de Aplicación		
	PL	PC	PC-A	PL-R	PC-R	PC-A-R
						
Caso	1	2	3	4	5	6
Estimación Analítica Literatura	SI*	SI*	SI	NO	NO	NO
Estimación Experimental Literatura	SI	SI	SI	NO	NO	NO
Estimación por MEF-NL Literatura	SI	SI	SI	NO	NO	NO
Estimación por MEF-NL Autor	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Método Autor	SI*	SI*	Geometría modificada y AEF	Geometría modificada y AEF	Geometría modificada y AEF	Geometría modificada y AEF

SI*: Método reportado MAE. SI: Otros métodos reportados. NO: No se encuentra reportado.

Durante el período de ejecución de este trabajo no se encontraron reportes relacionados con el tratamiento del refuerzo con barras para perfiles de lámina delgada estructurales con aplicaciones en estantería.

5.2 Características de los Modelos de validación

Se describe en esta sección las características de los modelos desarrollados. El detalle del proceso se presenta en el [Anexo B](#).

La configuración estándar del modelo para perfiles en lámina delgada a compresión, ver **Figura 5-1**, consiste de:

1. Un perfil con un centroide identificado
2. Placas de adaptación. Las placas tienen la función de distribuir de forma homogénea la carga aplicada al perfil.

Esta configuración se usa porque es directamente comparable con el ensayo real, según la NTC 5689, donde al perfil en estudio se unen las placas de distribución de carga. Se

busca que los extremos del perfil sean mecanizados antes de ser unidos, normalmente por soldadura, con el fin de evitar desviaciones que afecten el comportamiento del perfil.

Figura 5-1: Montaje estándar para modelamiento de perfiles de lámina delgada a compresión. a) Izquierda, Modelo del autor. b) Derecha, Modelo para ensayo [19] .

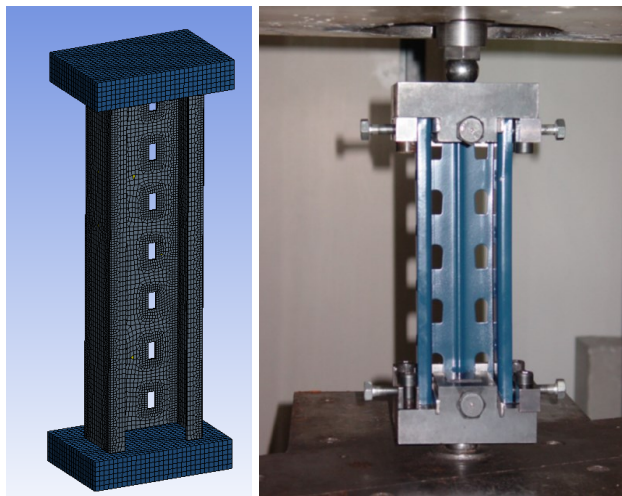


Figura 5-2: Placas de montaje desarrolladas y con ensayo para futura experimentación. Fte Autor.



En el desarrollo del presente trabajo, preparando la futura experimentación el autor desarrolló, fabricó y ensayó, un diseño de placas de adaptación para perfiles de lámina delgada con una funcionalidad similar a la observada en la **Figura 5-1b)**, donde no es necesario realizar las soldaduras de las placas al perfil si no que se requiere un buen acabado en el extremo del perfil y la placa de adaptación tiene un sistema de ajuste del perfil. Dichas placas se pueden ver en la **Figura 5-2**.

Teniendo en cuenta las configuraciones para estimar la capacidad de carga a compresión, se definió el proceso completo de análisis por elementos finitos. Este proceso está en el

[Anexo B](#). En la Tabla 5-4 se presentan las características básicas de los modelos utilizados en cada uno de los casos a estudiados.


Tabla 5-4. Descripción casos de validación y aplicación para el análisis no lineal. Fte Autor.

	Casos de Validación			Casos de Aplicación		
	PL	PC	PC-A	PL-R	PC-R	PC-A-R
Caso	1	2	3	4	5	6
Geometría y material	Angulo lados iguales de 7 mm, labios iguales de 15 mm, espesor de 1,2 mm	Altura 96 mm, Aleta 48 mm, labios iguales de 12 mm, espesor de 1,5 mm.	Altura 98,4 mm, Aleta 52 mm, labios de 16 mm, espesor de 1,2 mm.	Angulo lados iguales de 70 mm, labios iguales de 15 mm, espesor de 1,2 mm. Dbarra:6mm	Altura 96 mm, Aleta 48 mm, labios iguales de 12 mm, espesor de 1,5 mm Dbarra:6mm	Altura 96 mm, Aleta 48 mm, labios iguales de 12 mm, espesor de 1,5 mm Dbarra:6mm
Elementos utilizados	L=2500; Shell181-17000 Solid 186: 6912	L=3000; Shell181: 44772 Solid 186: 3744 Conta174 y Targe170: 140322	L=360; Shell181: 7872 Solid 186: 7200 Conta174 y Targe170: 31560	L=2500; Shell181: 17000 Solid 186: 6912 Conta174 y Targe170: 35152	L=1500; Shell181: 4200 Solid 187: 28262 Conta174 140322 Targe170: 9600	L=1500; Shell181: 6541 Solid 187: 69635 Conta174 140322 Targe170: 47784
Nodos	L=2500; 17535	L=3000; 64409	L=3600; 42581	L=2500; 50585	L=1500; 55284	L=1500; 124573
Material	Acero Lámina $F_y=580$ MPa $F_u=595$ MPa	Acero Lámina $F_y=550$ MPa; $F_u=570$ MPa	Acero Lámina $F_y=193$ MPa	Acero Lámina $F_y=580$ MPa $F_u=595$ MPa Acero Ref. NTC2286	Acero Lámina $F_y=580$ MPa $F_u=595$ MPa Acero Ref. NTC2286	Acero Lámina $F_y=550$ MPa; $F_u=570$ MPa Acero Ref. NTC2286

5.3 Casos de Validación

Los criterios utilizados para seleccionar los casos de validación fueron los siguientes: Existencia de resultados experimentales, resultados analíticos y resultados de simulaciones, especialmente por el método de los elementos finitos.

5.3.1 Caso 1: Ángulo con labios en las aletas

Modelo por validar 	Perfil tipo ángulo con labios, sin agujeros y sin refuerzo externo, cargado concéntricamente a compresión.		
Investigación	Experimental Investigation of Cold-Formed Steel Lipped Angle Concentrically Loaded Compression Members [32]		
Descripción del modelo	En esta investigación se presentan resultados de ensayos experimentales en perfiles de lámina delgada, CFS por sus siglas en inglés de Cold-Formed Steel. Adicionalmente en esta referencia se realizan los cálculos de estimación de cargas utilizando el método de anchos efectivos (norma AISI, referencia principal de NSR-10 F-4) y se comparan con los resultados con experimentos en perfiles de diferentes tamaños y longitudes.		
Geometría y Material	Geometría: Angulo lados iguales de 70 mm, labios iguales de 15 mm, espesor de 1,2 mm	Material Acero F _y =580 MPa F _u =595 MPa	
Resultados de interés			
Longitud (L)	250 mm	1500 mm	2500 mm
Carga Ultima MAE (AISI)	60.3 kN	18.9 kN	8.5 kN
Carga Ultima Experimentación	57.9 kN	33.4 N	27.2 kN
Carga Ultima MEF-NL	55.2 kN	34.8 N	26.7 kN
Resultados de la validación			
Carga Ultima MEF-NL ANSYS Autor	63.9 kN	36.3 kN	22.7 kN
Carga estimada Metodología propuesta por Autor	60.9 kN	19.4 kN	8.6 kN

Con el fin de evaluar el comportamiento de las deformaciones y determinar el tipo de pandeo que se presentó, se evaluó la deformación en la sección transversal donde se encontró la mayor deformación y esta se comparó con la obtenida a partir de los resultados de implementar el modelo en el Software CUSFM el cual se utilizó como referencia para verificar la forma de pandeo lineal. En la **Figura 5-3**, se encuentran las secciones de los perfiles validados, donde se aprecia que para columnas cortas literales a) y d) la forma del pandeo local obtenidas mediante FEM y mediante CUSFM es consistente. Se verifica claramente que se trata de un caso de pandeo local debido a que los dobleces del perfil permanecen en su posición original.

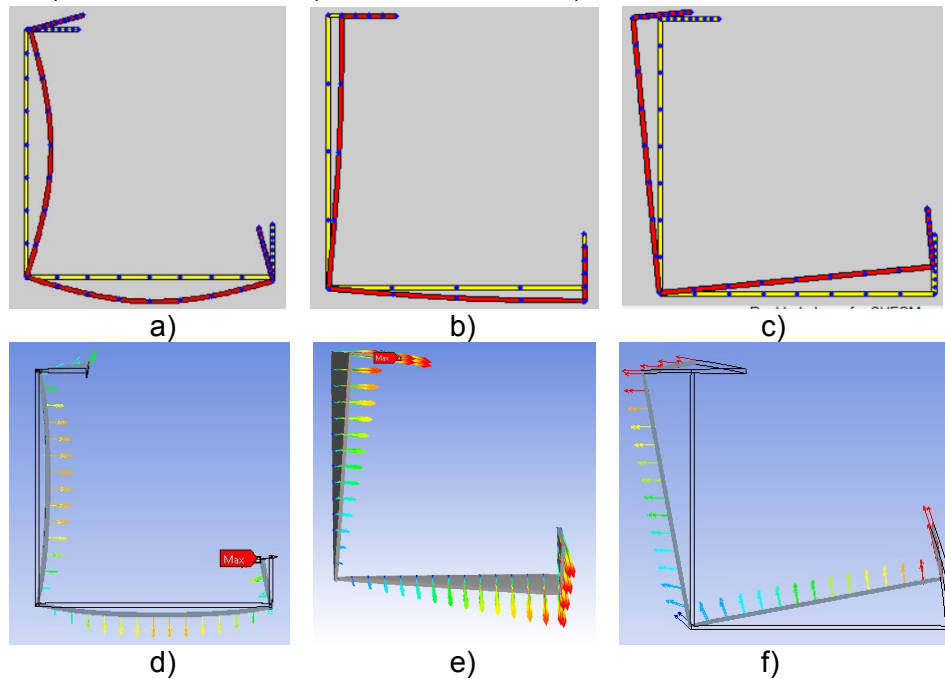
En el caso de relaciones L/r_o de 30, columna de 1500 mm, literales b) y e) se encontró la formación de pandeo distorsional, evidenciado por la separación de los dobleces de sus puntos originales.

Para las relaciones L/r_o de 50, columna de 2500 mm literales c) y f) se encontró la formación de pandeo distorsional, flexotorsional y también de pandeo global caracterizado por un desplazamiento y rotación de la sección.

Figura 5-3: Deformaciones en el centro de la columna (PL 70x70x1.5).

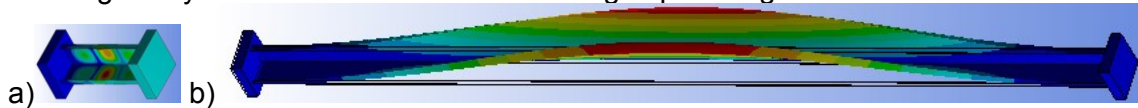
CUSFM: a) Para $L=250$ mm, b) Para $L=1500$ mm y c) Para $L=2500$ mm.

ANSYS: d) Para $L=250$ mm, 3) Para $L=1500$ mm e) Para $L=2500$ mm. Fte. Autor.



Se encontró una gran similitud entre los modos de pandeo entre el software de bandas finitas CUSFM y el modelo de elementos finitos desarrollado en ANSYS como mecanismo de validación. De la misma forma se encuentra consistencia entre los modos de pandeo en columna cortas, pandeos de tipo local y en columnas largas pandeos de tipo flexotorsional y global, como se indica en la **Figura 5-4**. Las imágenes de esta figura son proporcionales al tamaño real del modelo.

Figura 5-4: Deformaciones en perfil L: a) Con pandeo local en columnas cortas; b) Con pandeo global y flexo-torsional en columnas largas para ángulos.




5.3.2 Caso 2: Perfil C con labios en las aletas

Con el fin de evaluar el efecto que tiene la longitud respecto a la carga de pandeo y el cambio de sección se presentan los siguientes sub-casos:

Sub-caso 1: Sección constante con variación de la longitud.

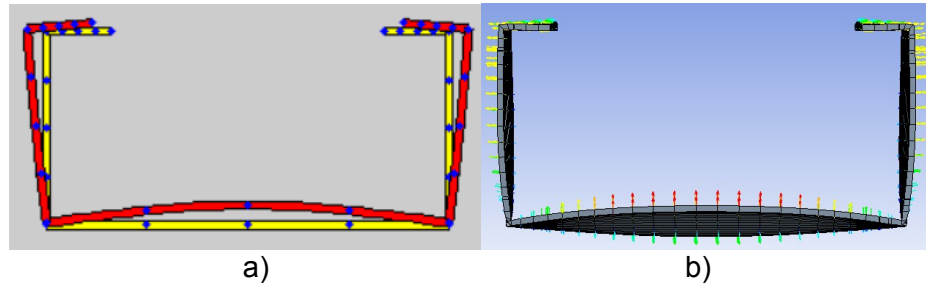
Sub-caso 2: Sección y longitud constante con variación de material y espesor.

5.3.2.1 Variación de longitudes

Modelo por validar 	Perfil C con labios, sin agujeros y sin refuerzo externo, cargado concéntricamente a compresión.		
Título	A. Design of lipped channel columns. [40] B. Channel Columns Undergoing Local, Distortional, and Overall Buckling.[41]		
Descripción del modelo	En esta investigación se presentan resultados de ensayos experimentales en perfiles de lámina delgada, CFS por sus siglas en inglés, en perfil C Cold-Formed Steel. Adicionalmente en estas referencias se presentan los resultados de estimación de cargas utilizando el método de elementos finitos, la norma AISI y se comparan con los resultados con experimentos en perfiles de diferentes longitudes.		
Detalle Geométrico	Geometría: Perfil C de altura 96 mm, Aleta 48 mm, labios iguales de 12 mm, espesor de 1,5 mm. Material: Acero. $F_y=550$ MPa; $F_u=570$ MPa		
Resultados de interés			
Longitud (L)	300 mm	1500 mm	3000 mm
Carga Ultima MAE	100.0 kN	85.0 kN	47.5 kN
Carga Ultima Experimentación	111.9 kN	98.6 kN	54.3 kN
Carga Ultima MEF-NL	120.5 kN	101.9 kN	51.8 kN
Resultados del autor			
Carga Ultima MEF-NL ANSYS Autor	107.6 kN	105.41 kN	55,5 kN
Carga estimada Metodología propuesta por Autor	99.1 kN	87.5 kN	59.8 kN

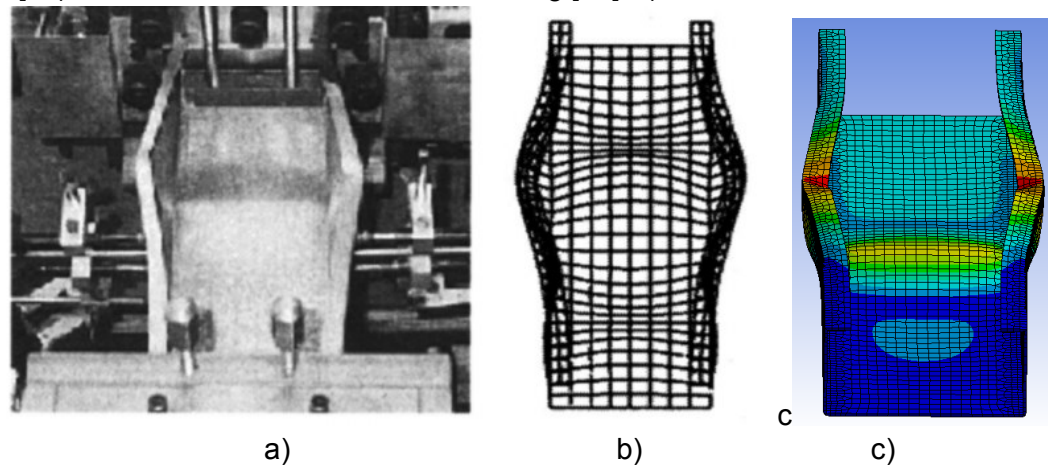
Utilizando CUSFM se construyó un modelo de referencia para extraer las deformaciones correspondientes a la sección media del perfil, encontrando grandes similitudes con la sección deformada encontrada del modelo de elemento finitos implementado en ANSYS por el autor, los resultados se ilustran en la **Figura 5-5**.

Figura 5-5: Deformaciones en el centro de la columna. a) CUSFM. b) ANSYS Fte. Autor.




Se evidencia en forma clara la formación de pandeo local en el alma y pandeo distorsional en las aletas. Al realizar el seguimiento hasta la carga última se encontró que los anteriores tipos de pandeo son predecesores de la deformaciones excesivas involucradas con la pérdida de capacidad final de carga del perfil, ver **Figura 5-6**.

Figura 5-6: Perfil en C deformado hasta la carga última a compresión. a) Experimental Young [41]. b) Modelo de elementos finitos de Young [41]. c) Modelo en ANSYS. Fte. Autor.



En las diferentes longitudes modeladas se encontraron deformaciones muy similares a las descritas por [41], evidenciado la relación existente entre la longitud del perfil y la forma de pandeo dominante o presentada por el modelo antes de la disminución final de capacidad de carga.

5.3.2.2 Variación de espesor y materiales

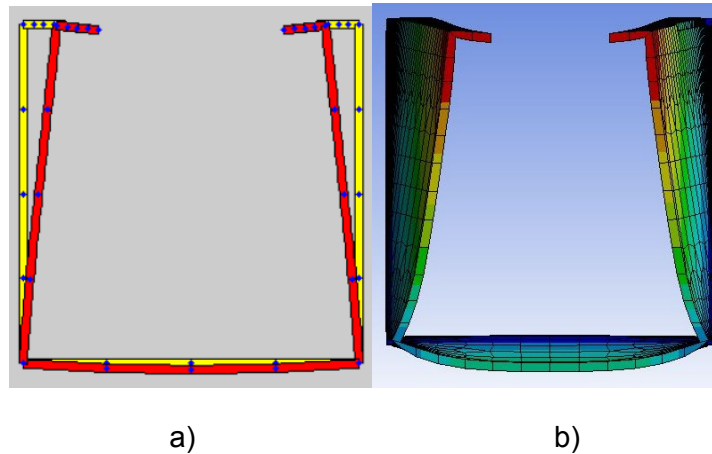
Modelo por validar 	Perfil C con labios, sin agujeros y sin refuerzo externo, cargado concéntricamente a compresión.		
Título	Experimental and numerical studies of fire exposed lipped channel columns subject to distortional buckling[100].		
Descripción del modelo	En esta investigación se presentan resultados de ensayos experimentales en perfiles de lámina delgada, CFS por sus siglas en inglés, en perfil C Cold-Formed Steel. Adicionalmente en esta referencia se presentan los resultados de estimación de cargas utilizando el método de elementos finitos y el estándar AISI S100 para finalmente comparar con los resultados de experimentos en perfiles de diferentes longitudes.		
Detalle Geométrico	Geometría: Perfil C de altura 40 mm, Aleta 40 mm, labios iguales de 5 mm, Material: Acero		
	Espesor=1 mm $F_y=351$ MPa	Espesor=0.95 mm $F_y=664$ MPa	Espesor=1.15 mm $F_y=664$ MPa
Resultados de interés			
Longitud (L)	300 mm	300 mm	300 mm
Carga Ultima MAE (AISI)	32.2 kN	38.4 kN	52.7 kN
Carga Ultima Experimentación	30.8 N	38.1 kN	54.2 kN
Carga Ultima MEF-NL	33.2 N	42.0 kN	60.3 kN
Resultados del autor			
Carga Ultima MEF-NL ANSYS Autor	31.9 kN	41.3 kN	58.7 kN
Carga estimada Metodología propuesta por Autor	30.5 kN	40.7 kN	55.4 kN

Al variar el espesor y la calidad del material se encontró que se pueden modificar la capacidad de carga, y es posible, como en este caso, encontrar que, para la misma sección y material, una variación de 21 % en espesor corresponde un aumento del 42% en la capacidad de carga.

En la revisión de la deformación de los elementos de la sección se encontró consistencia entre las deformaciones presentadas por los experimentos de la referencia, y los modelos desarrollados en la presente investigación tanto en ANSYS como CUSFM. En la **Figura**

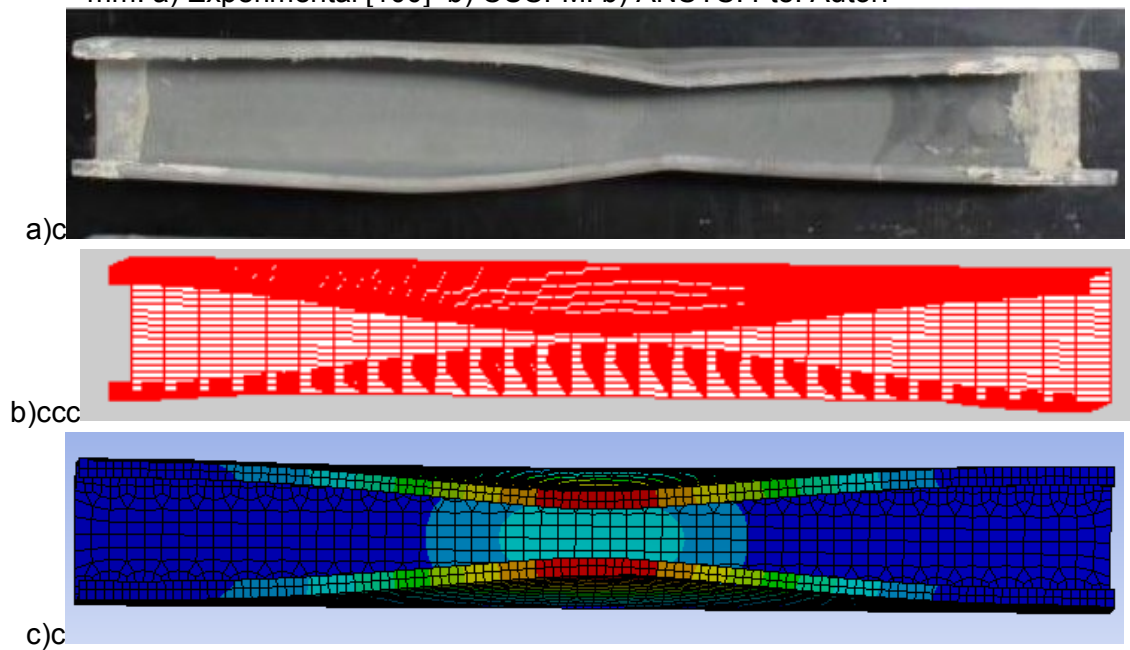
5-7 se muestran las secciones deformatas a la altura media del perfil para las cargas de pandeo lineal. Se observa notablemente la distorsión en las aletas y el pandeo global en el alma.

Figura 5-7: Deformaciones en el centro de la columna PC 40x40x5x1.0 x 300 mm. a) CUSFM. b) ANSYS Fte. Autor.




En la **Figura 5-8** se muestra un perfil con los resultados experimentales de la deformación plástica de la aleta obtenidos en la referencia del presente caso. Los mismos resultados, en cuanto a la tendencia de deformación de la aleta, se obtuvieron al validar mediante CUSFM y ANSYS el mismo modelo numérico.

Figura 5-8: Deformaciones en el centro de la columna PC 40x40x5x1.0 x 300 mm. a) Experimental [100] b) CUSFM. b) ANSYS. Fte. Autor.



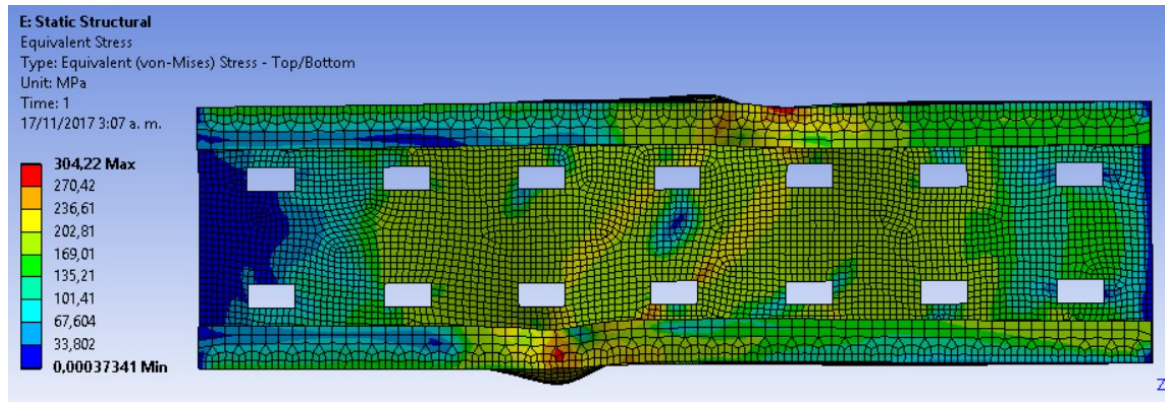
5.3.3 Caso 3: Perfil C con labios en las aletas y perforaciones en el alma

Modelo por validar 	Perfil C con labios, con perforaciones y sin refuerzo externo, cargado concéntricamente a compresión.	
Título	Prediction of ultimate capacity of perforated lipped channels.[54]	
Descripción del modelo	En esta investigación se presentan resultados de ensayos experimentales en perfiles de lámina delgada con perforaciones. Adicionalmente se presentan los cálculos de estimación de cargas utilizando el método de anchos efectivos (norma AISI, referencia principal de NSR-10 F-4). Se presenta una propuesta de cálculo para obtener anchos efectivos en el alma con perforaciones y se comparan con los resultados con experimentos en perfiles de diferentes tamaños y longitudes.	
Detalle Geométrico	Geometría: Perfil C de altura 98, 4 mm, Aleta 52 mm, labios de 16 mm, espesor de 1,2 mm. Material: Acero; $F_y=193\text{MPa}$	Geometría: Perfil C de altura 100 mm, Aleta 52 mm, labios de 16 mm, espesor de 2 mm. Material: Acero; $F_y=280,3\text{ MPa}$
Resultados de interés		
Longitud (L)	360 mm	370 mm
Carga Ultima MAE (AISI Adaptado)	41,6 kN	92.5 kN
Carga Ultima Experimentación	41,2 kN	91.1 kN
Resultados del autor		
Carga Ultima MEF-NL ANSYS Autor	42,7 kN	94.2 kN
Carga estimada Metodología propuesta por Autor	41,5 kN	96,7 kN

Varias referencias [41, 101] coinciden en tratar los elementos con dos filas de perforaciones, dividiéndolos en tres partes. Las dos laterales se tratan como elementos no rigidizados que terminen donde empiezan las perforaciones. La franja central consiste en una franja que contiene los agujeros y el material en el centro. Referente a la franja central

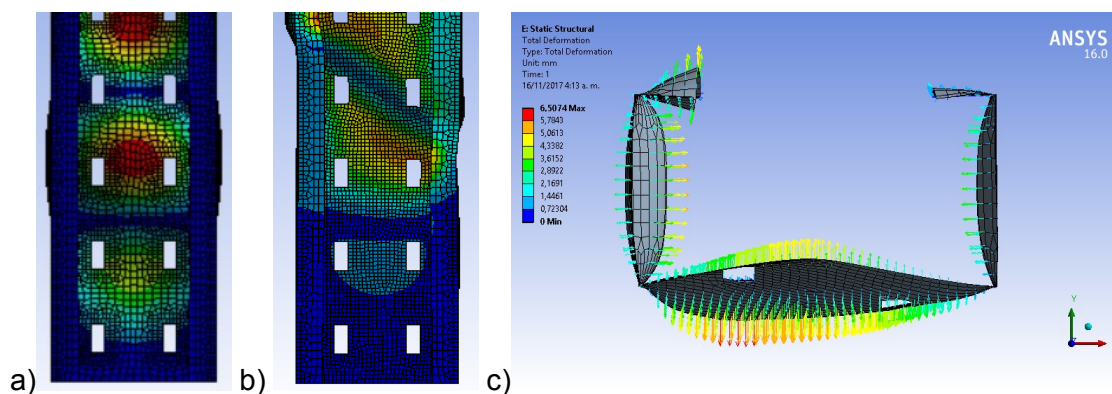
existen diferentes versiones de cómo tener en cuenta su capacidad portante. En [93] se tratan con un criterio de espesores reducidos, y en la referencia del presente caso se trata con un criterio de ancho efectivo. En [54], se aplican técnicas de regresión lineal para ajustar el ancho efectivo del elemento central de tal forma que conocido el ancho efectivo de los elementos laterales se establezca un ancho efectivo central consistente con la capacidad de carga de perfil hallada experimentalmente.

Figura 5-9: Esfuerzos en columna con perforaciones en el alma PCA 98x52x16x1.2 x 360 mm. ANSYS Fte. Autor.




En la **Figura 5-9** se muestra que el espacio entre perforaciones presenta un esfuerzo del mismo orden de magnitud que el de los elementos laterales entre el borde y los agujeros. De esta forma se evidencia la necesidad de incluir un método de análisis que considere en la estimación de la capacidad de carga del perfil el espacio intermedio entre los agujeros. En la **Figura 5-10** se puede observar la diferencia entre el modo de pandeo lineal y la deformación final para la carga última.

Figura 5-10: Deformaciones en columna con perforaciones en el alma de un PCA 98x52x16x1.2 x 360 mm. a) Pandeo lineal con ANSYS b) Carga ultima no lineal con ANSYS. c) Sección Carga última no lineal con ANSYS. Fte. Autor.



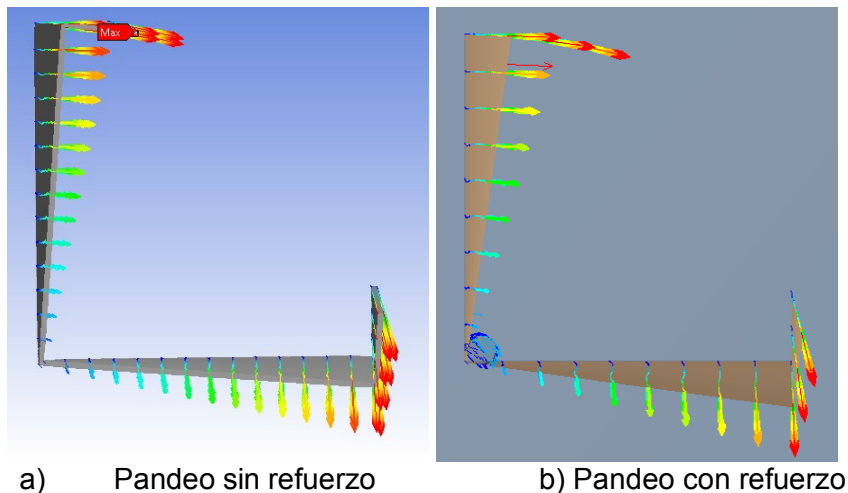
5.4 Casos de aplicación a perfiles reforzados externamente sin y con perforaciones

5.4.1 Caso 4: Angulo con labios en las aletas y reforzado con barras

Modelo por validar 	Perfil tipo ángulo con labios, sin agujeros y con refuerzo externo, cargado concéntricamente a compresión.		
Detalle Geométrico	Geometría: Angulo lados iguales de 70 mm, labios iguales de 15 mm, espesor de 1,2 mm, barra de refuerzo D6 mm	Material Base: $F_y=580$ MPa $F_u=595$ MPa Refuerzo: NTC2289, $F_y=420$ MPa	
Resultados del autor			
Longitud	250 mm	1500 mm	2500 mm
Carga Última MEF-NL ANSYS Autor	65.4 kN	38,1 kN	25,1 kN
Carga estimada Metodología propuesta por Autor	69,8 kN	16,7 kN	6,5 kN

Se evaluaron 3 longitudes de perfiles en ángulo con refuerzos. Para longitudes de 250 mm la diferencia en carga y forma de pandeo es casi imperceptible. La sección sin refuerzo para 2500 mm tiene similar forma de pandeo a la sección reforzada como se aprecia en la **Figura 5-11**.

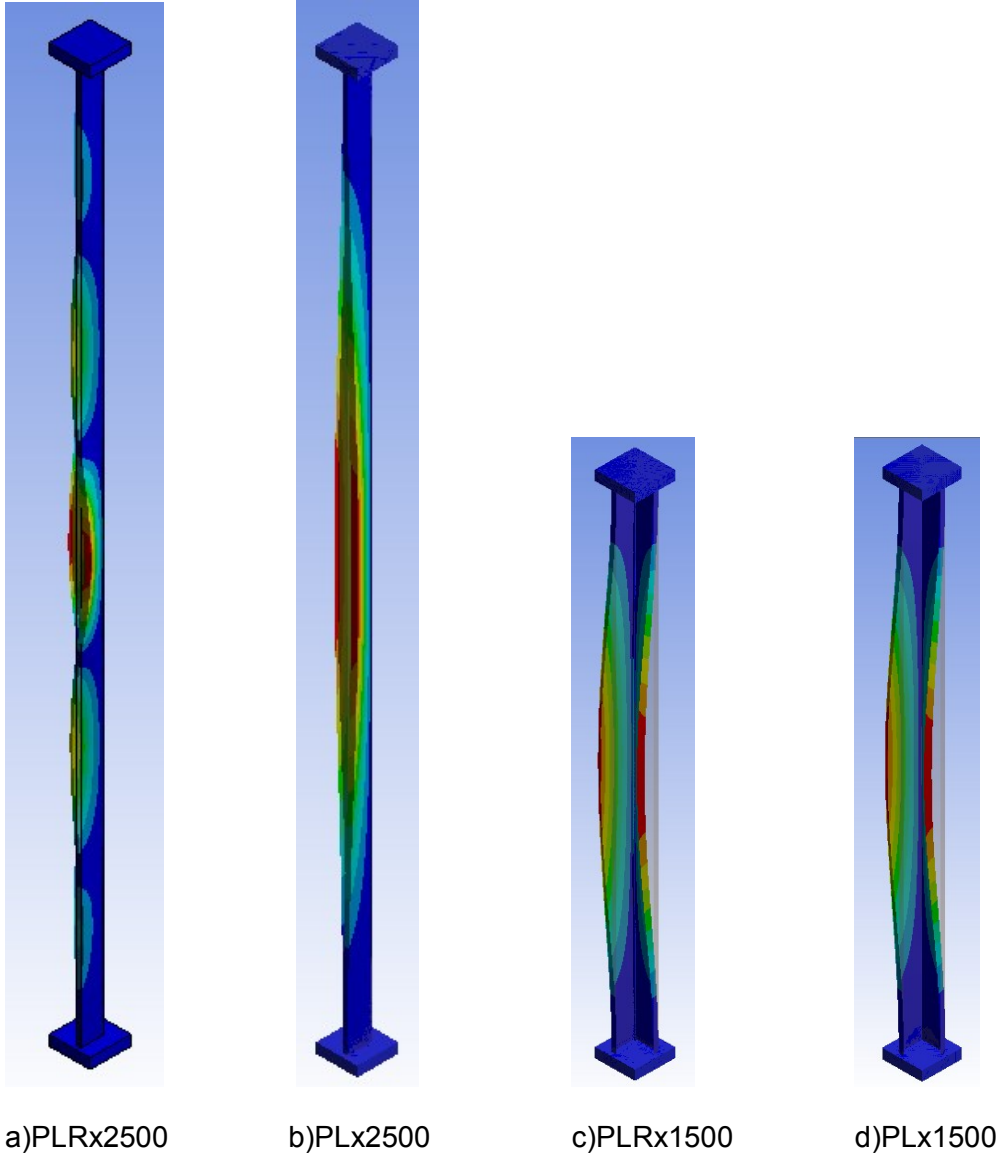
Figura 5-11: Similitud en forma de pandeo en sección L con labios reforzada y no reforzada para L=1500 mm




Adicionalmente se evidencia en la capacidad de carga una importante diferencia entre el perfil reforzado y el no reforzado.

Se encontró que para longitudes de 2500 mm la forma de pandeo si es modificada completamente, generándose un pandeo local en las aletas del perfil para al caso reforzado, mientras en el caso no reforzado el pandeo global tiene mayor influencia, como se puede ver en la **Figura 5-12**

Figura 5-12: Modificación en forma de pandeo, para Perfil tipo ángulo con labios.
a) Pandeo sin refuerzo. b) Pandeo con refuerzo.

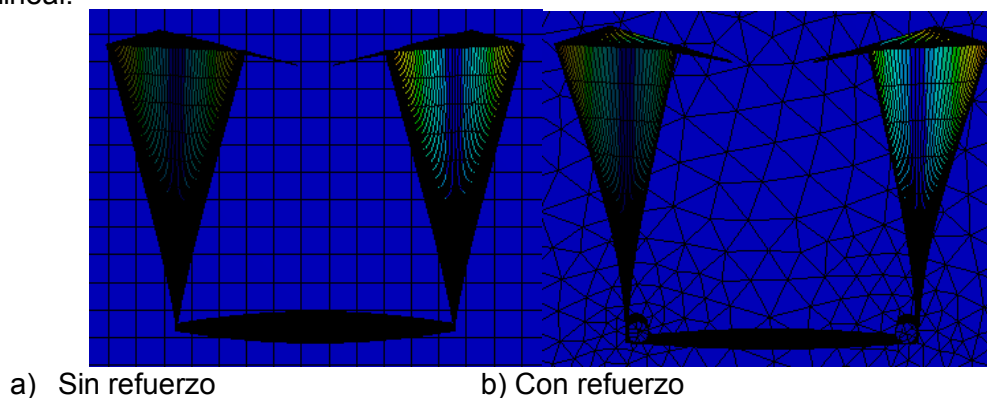


5.4.2 Caso 5: Perfil C con labios en las aletas y refuerzo con barras

Modelo por validar 	Perfil C con labios, sin agujeros y con refuerzo externo, cargado concéntricamente a compresión.
Detalle Geométrico	Geometría: Perfil C de altura 80 mm, Aleta 80 mm, labios iguales de 15 mm, espesor de 1,5 mm. Material: Acero. $F_y=550$ MPa; $F_u=570$ MPa Refuerzo: D=6mm, Refuerzo NTC2289
Resultados del autor	
Longitud	1500 mm
Carga Ultima MEF-NL ANSYS sin refuerzo por Autor.	108,8 kN
Carga Ultima MEF-NL ANSYS con refuerzo por Autor.	167,2 kN
Carga estimada sin refuerzo Metodología propuesta por Autor	104,6 kN
Carga estimada con refuerzo Metodología propuesta por Autor	117,3 kN

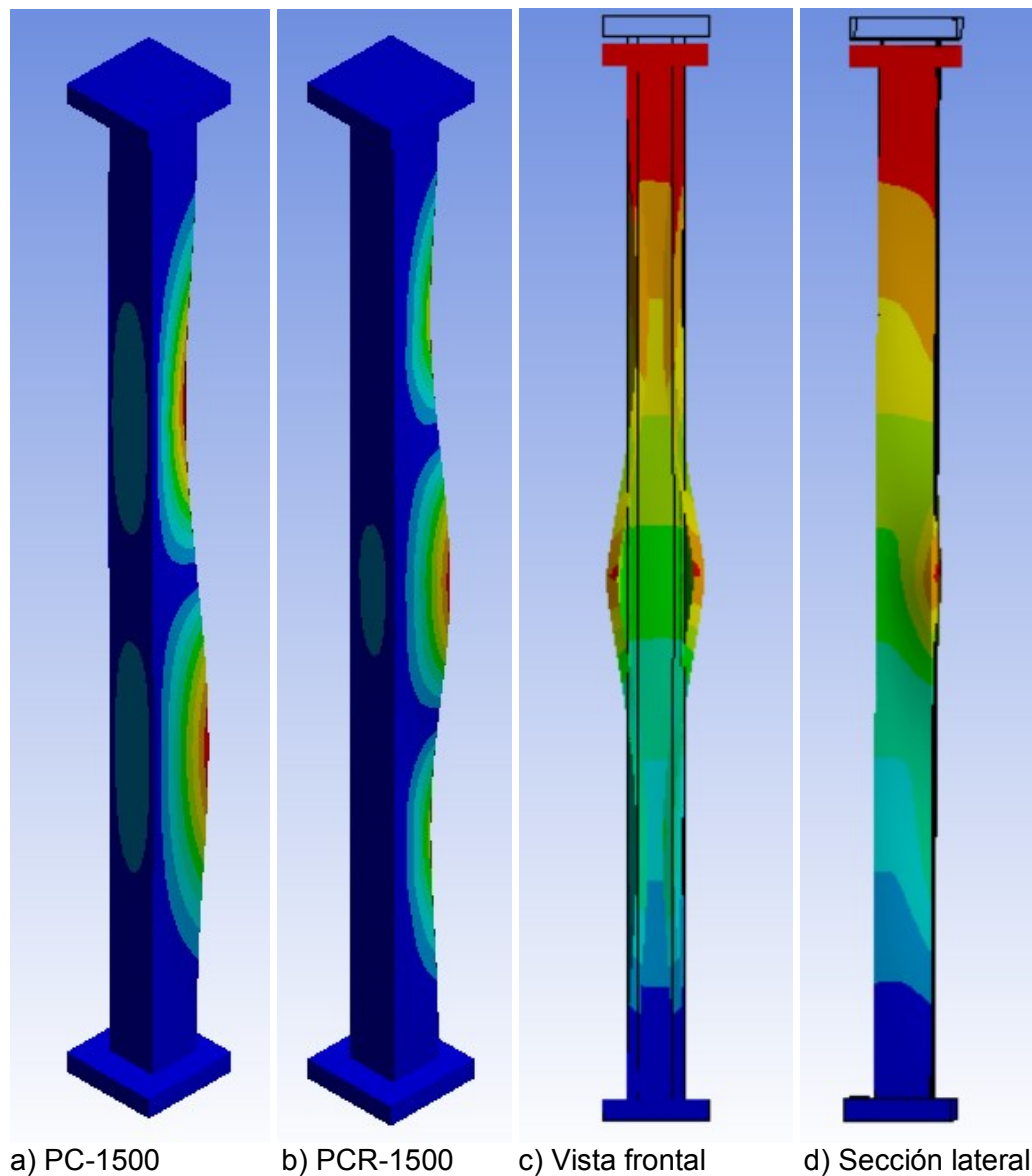
Al evaluar la condición de perfil C reforzado, como en **Figura 5-13** que permite evidenciar el efecto del refuerzo es aumentar la rigidez del alma, limitando su pandeo global.

Figura 5-13: Modelo de elementos finitos del perfil reforzado en C con deformación en rango lineal.




El mismo efecto se evidencia más claramente en la vista general del modelo, dónde se observa en el alma que las deformaciones debidas al pandeo local son más pronunciadas en el perfil sin refuerzo y el pandeo global se acentúa más en el mismo caso sin refuerzo. En el perfil con refuerzo la deformación por pandeo local es menor, y el pandeo global es casi imperceptible, asociando que el refuerzo podría influir en limitar el pandeo local del alma. En la **Figura 5-14** se puede evidenciar la deformación, encontrado a que en carga ultima para este tamaño es de tipo distorsional. Igualmente se puede evidenciar el poco pandeo que tiene el refuerzo y por lo tanto el alma.

Figura 5-14: Vista general Modelo de elementos finitos del perfil reforzado en C deformado

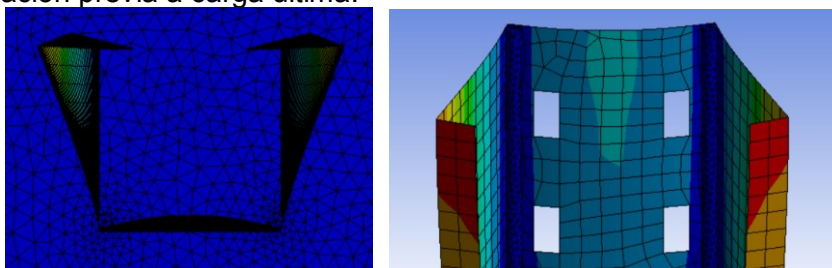


5.4.3 Caso 6: Perfil C con labios en aletas, perforaciones en alma y refuerzo con barras de acero

Modelo por validar 	Perfil C con labios, con agujeros y con refuerzo externo, cargado concéntricamente a compresión.
Detalle Geométrico	Geometría: Perfil C de altura 80 mm, Aleta 80 mm, labios iguales de 15 mm, espesor de 1,5 mm. Agujeros: Altura 32.40 mm: Ancho 19.05 mm, Separación: 26.5 mm Paso vertical: 51 mm Material: Acero. $F_y=550$ MPa; $F_u=570$ MPa Refuerzo: D=6mm; Refuerzo NTC2256
Resultados del autor	
Longitud	1500 mm
Carga Ultima MEF-NL ANSYS Autor sin refuerzo	133,0 kN
Carga Ultima MEF-NL ANSYS Autor Con refuerzo	152,3 kN
Carga estimada sin refuerzo Metodología propuesta por Autor	96,2 kN
Carga estimada con refuerzo Metodología propuesta por Autor	106,12 kN

Al evaluar la condición de perfil C reforzado con agujeros en la **Figura 5-15** se evidencia el efecto de las perforaciones, generando un aumento en la deformación por pandeo local en el alma respecto a lo observado en el perfil sin perforaciones.

Figura 5-15: Modelo de elementos finitos del perfil reforzado en C con agujeros y con deformación previa a carga última.



En la vista general del modelo, **Figura 5-16**, se evidencia la influencia de los agujeros donde, comparado con el caso 5 mostrado en la **Figura 5-14 b**, la presencia de los agujeros acentúa el pandeo global. También se evidencia la afectación por pandeo local de las aletas,

Figura 5-16: Comparación Modelo de elementos finitos del perfil C con y sin agujeros.

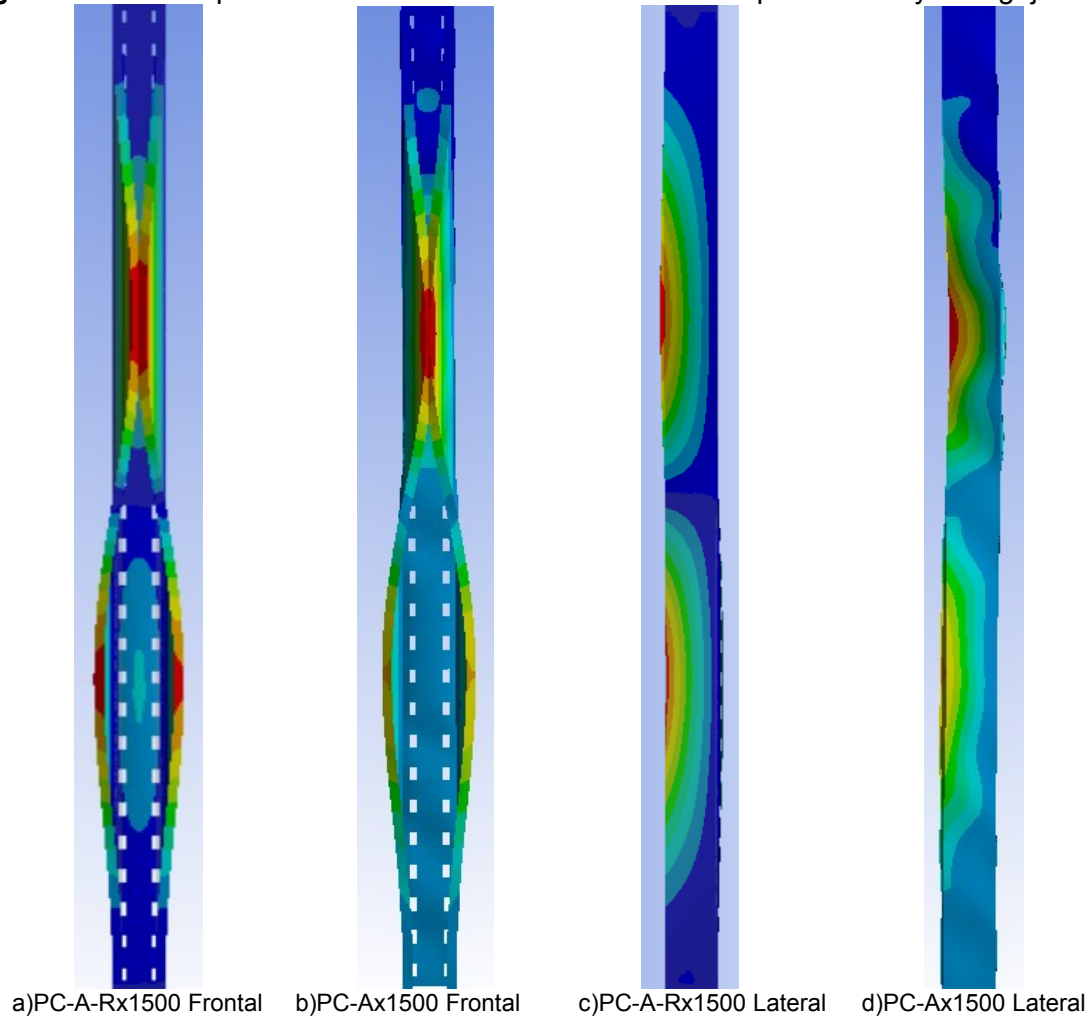
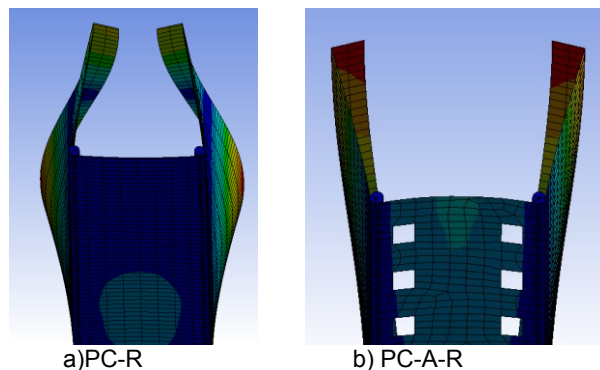


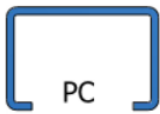
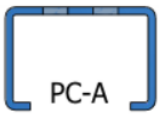
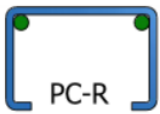
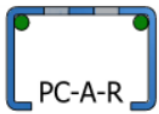
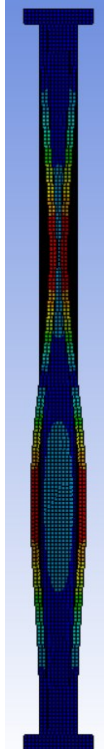
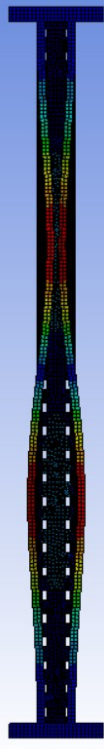
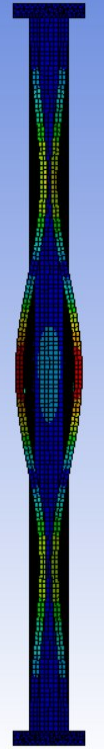
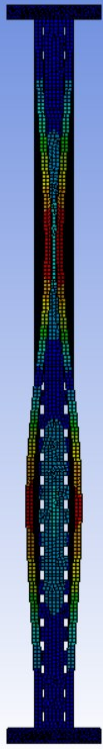
Figura 5-17: Afectación del perfil C reforzado en el alma por los agujeros.



5.5 Análisis y discusión

Se presenta aquí el resultado aplicado a un perfil C sobre la diferencia neta en capacidad de carga cuando se le realizan perforaciones en el alma, se le coloca dos refuerzos en barra de acero NTC2286 y cuando se aplican ambas condiciones.

Variación de cargas ultimas estimadas por método de elementos finitos

Sección transversal				
Deformación				
Estimada por MEF Autor	156,8 kN	148 kN	167,2 kN	152,3 kN
Diferencia respecto al perfil C-MEF	0 (0%)	-8,9 kN (94%)	+10 kN (107%)	-4,5 kN (97%)
Carga Estimada por Autor	104,6 kN	96,2 kN	117,3 kN	106,1 kN
Diferencia respecto al perfil C-Met Autor	0 (0%)	-8,4 kN (92%)	+12,7 kN (112%)	+1,5 kN (102%)
Desviación PuAutor/PuMEF	0,67	0,65	0,7	0,7

Variación de las cargas encontradas en la literatura para análisis similares.

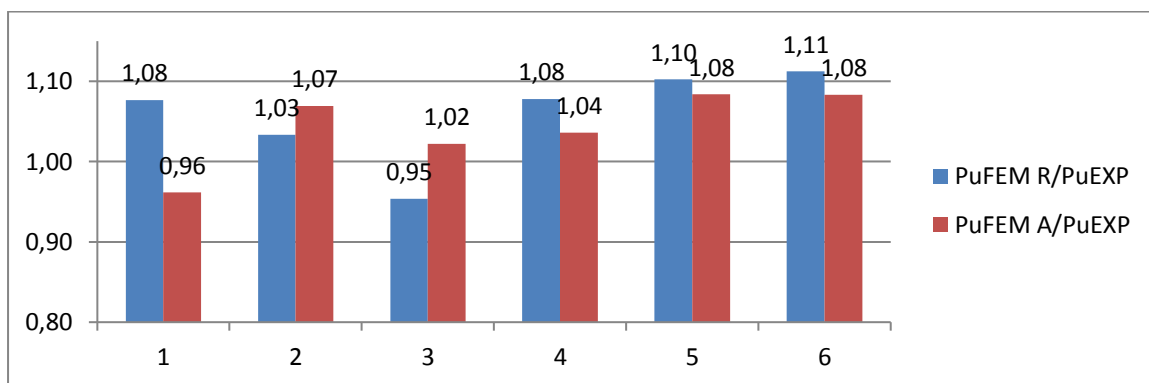
	Literatura Sin refuerzo		Autor Con refuerzo	
Sección transversal	ITEM 1 PL L=1500 mm	ITEM 2 PC L=1500 mm	ITEM 3 PLR L=1500 mm	ITEM 4 PCR L=1500 mm
Estimada por MEF	34,8 kN	102 kN	38,1 kN	167,2 kN
Carga Estimada por MAE	18,9 kN	85 kN	16,7 kN	117,3 kN
Desviación PuAutor/PuMEF	0,54	0,83	0,44	0,7

5.5.1 Análisis y discusión de la desviación de los resultados

A partir de los resultados obtenidos de la validación y aplicación a diferentes casos se realizó un estudio sobre la desviación de los resultados. El estudio comparativo se presenta en las siguientes tablas.

El objeto del estudio buscó determinar en qué magnitud la metodología propuesta para perfiles reforzados y con perforaciones es comparable con la metodología disponible para perfiles corrientes.

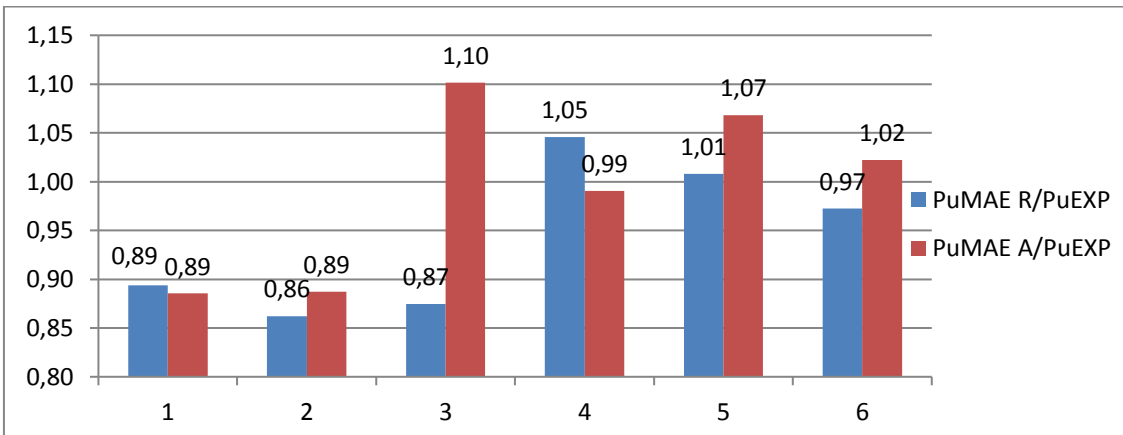
Figura 5-18: Comparación resultados Pu-FEM-R/Pu-EXP y Pu-FEM-A/Pu-EXP.



Debido a que la mayor cantidad de referencias comparables provienen de la experimentación se compararon, por una parte, los resultados experimentales de perfiles corrientes (Pu-EXP) con el respectivo modelo numérico de la referencia (Pu-FEM-R) y lo mismo con el modelo numérico del autor (Pu-FEM-A), los datos se pueden ver resumidos en la **Figura 5-18**, obteniendo un promedio para la relación Pu-FEM-R/Pu-EXP=1.06 (Desviación Estándar, DE=0.06) y Pu-FEM-A/Pu-EXP=1.04 (Desviación Estándar, DE=0.05).

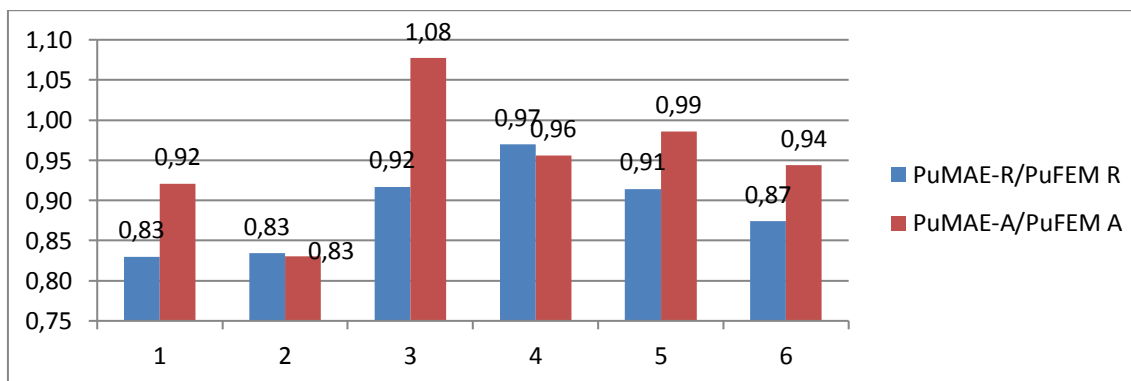
De forma similar se compararon datos experimentales en perfiles corrientes (Pu-EXP) con el método de ancho efectivos según norma de las referencias (Pu-MAE-R) y se compararon con las mismas realizadas por el autor (Pu-MAE-A), y se resumen en la **Figura 5-19** obteniendo un promedio para la relación Pu-FEM-R/Pu-EXP=0.87 (DE=0.076) y Pu-FEM-R/Pu-EXP=0.91 (DE=0.090).

Figura 5-19: Comparación resultados Pu-MAE-R/Pu-EXP y Pu-MAE-A/Pu-EXP.



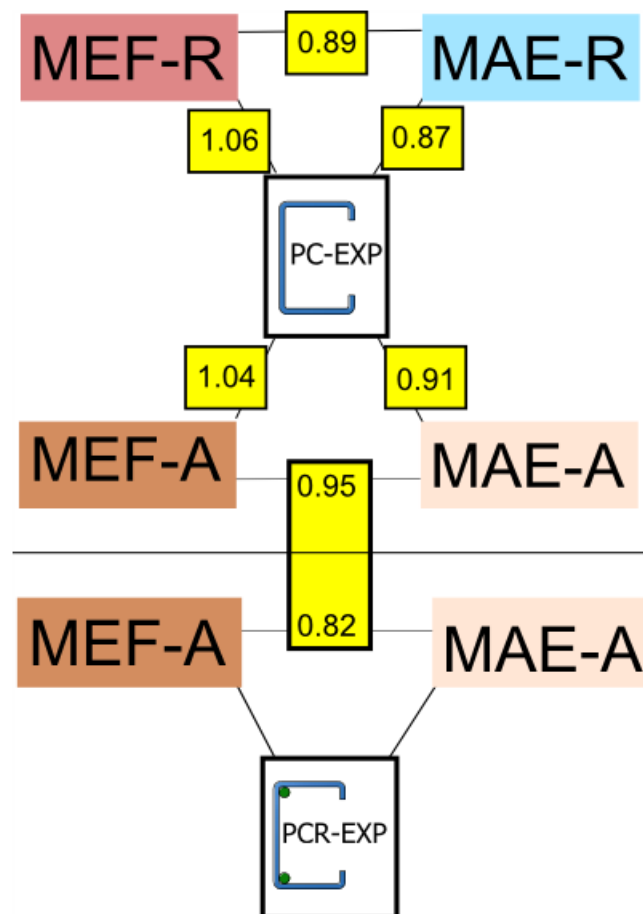
Por otra parte, ante la ausencia de datos experimentales sobre perfiles con refuerzo y o perforaciones, se optó por comparar los resultados del modelo de elementos finitos (Pu-FEM-R) y método de ancho efectivos según norma de las referencias (Pu-MAE-R) y se comparó con el método propuesto y su herramienta computacional (PuMAE-A) desarrollada en esta investigación en perfiles conocidos, estos resultados se resumen en la **Figura 5-20**, obteniendo un promedio para la relación Pu-MAE-R/Pu-FEM-R =0.89 (DE=0.054) y Pu-MAE-A/Pu-FEM-A =0.95 (DE=0.080). Este último valor se convierte en el valor de referencia de desviaciones en perfiles conocidos y que se debe comparar con los resultados para perfiles sin experimentación.

Figura 5-20: Comparación resultados Pu-MAE-R/Pu-FEM-R y Pu-MAE-A/Pu-FEM-A



De los modelos desarrollados para perfiles reforzados, se encontraron relaciones para Pu-MAE-A/Pu-FEM-A con promedios de 0.82 (DE: 0.21) lo cual comparado con el promedio de referencia 0.95, se puede determinar que si bien no se encuentran en un mismo valor los órdenes de magnitudes corresponde adecuadamente. El resumen de este análisis de la desviación, señalado en recuadros amarillos, se presenta en la **Figura 5-21**.

Figura 5-21: Comparación relativa del estudio de la desviación de los resultados. MEF Método de los Elementos Finitos, MAE Método de los Anchos Efectivos, -R información tomada de las referencias, -A información obtenida por el Autor.



En esta figura se resume el estudio de la desviación presentado en las tablas anteriores.

En la franja superior de la figura se indican las desviaciones promedio encontradas entre los ensayos experimentales, los modelos numéricos y de diseño reportados en las referencias (-R).

En la franja intermedia se señalan las desviaciones comparativas encontradas por el autor (-A) al simular, mediante métodos numéricos y de diseño los casos tomados como referencia para la validación.

En la franja inferior se indica la desviación entre el modelo numérico y el de diseño de acuerdo con el método propuesto e implementado computacionalmente en este trabajo.

Ante la ausencia de registro de datos experimentales sobre perfiles de lámina delgada con refuerzo y con perforaciones, se validaron los resultados de las desviaciones del método propuesto, así como la herramienta computacional a partir de modelos numéricos y de diseño. Se observa que la desviación de resultados, entre los modelos numéricos (MEF) y los de diseño (MAE) oscilan entre 0.89, 0.95 y 0,82, semejanza que puede considerarse como grado de confiabilidad en el uso de la metodología propuesta; sin embargo, se requiere de un plan experimental como fase final de la validación.

6 CONCLUSIONES Y TRABAJOS A FUTURO

Durante la realización de la presente investigación, concepción del modelo de diseño, elaboración de los algoritmos, implementación y validación de estos se evidenciaron algunos aspectos que merecen ser destacados en forma de conclusiones. Se identificaron también particularidades del modelo y herramienta computacional que proponen en forma de recomendaciones para la concepción y uso de la herramienta computacional desarrollada. Finalmente, desde la experiencia durante la investigación e implementación surgieron algunas inquietudes e interrogantes que se relacionan como trabajos a futuro.

6.1 Conclusiones

- Tomando como referencia elementos de la metodología para el diseño de perfiles convencionales en lámina delgada, se introdujeron variaciones que permitieron modelar los efectos del refuerzo, las perforaciones y la superposición de ambos. La filosofía de la metodología propuesta consistió en transformar tanto el refuerzo como la falta de material debido a las perforaciones, en elementos del perfil con anchos y espesores equivalentes.
- Mediante la extracción de probetas físicas del perfil objeto de estudio, se determinaron las propiedades mecánicas más relevantes para la presente investigación. Para lo cual fue necesario concebir y diseñar un montaje especial para el ensayo de caracterización del material que garantizara el alineamiento del eje de fuerzas con el centroide la probeta tanto en especímenes planos como con dobleces.
- Para el efecto del reforzamiento se lograron desarrollar 4 modelos, de los cuales fue seleccionado el que permitió de la manera más sencilla y consistente, desde el punto de vista del autor, la conversión del refuerzo en elementos de área equivalente y con la condición de mantener la ubicación del centroide efectivo del perfil inalterado.
- El método propuesto para la estimación de carga, luego de implementado, calibrado y validado mediante diferentes casos teóricos y experimentales, reportados en la literatura, mostró una gran similitud entre los resultados de la metodología aplicada a perfiles convencionales y la modelación numérica. Se observó que la desviación presentada al comparar los resultados obtenidos por el método de anchos efectivos sobre perfiles corrientes, respecto a los modelos

numéricos, es del mismo orden que el que resulta de comparar los resultados obtenidos por el método propuesto para perfiles con refuerzo y o perforaciones al ser comparados con sus equivalentes modelos numéricos. Argumento que genera cierto grado de confiabilidad en la aplicación de este método y su herramienta computacional en la aplicación a situaciones de refuerzo similares.

- La metodología validada con las simulaciones por elementos finitos permitió evidenciar la perdida en capacidad de carga debido a la presencia de perforaciones y también permitió evidenciar un aumento en la capacidad de carga por la inclusión del respectivo refuerzo con barras.
- La implementación del método propuesto se realizó en dos fases. La primera que permite obtener la sección transformada al considerar el refuerzo, se desarrolló en la plataforma de Matlab. Utilizando el GUI de esta plataforma se desarrolló una interfaz que permite visualizar las propiedades geométricas del perfil y la configuración resultante de considerar el refuerzo en conjunto con el doblez como un elemento plano. La segunda fase, se desarrolló en el ambiente Microsoft Excel, por su versatilidad en la presentación y gestión del proceso de estimación de la capacidad de carga y todo el proceso requerido para su evaluación.
- El uso del GUI de Matlab, resulto ser una herramienta de relativa facilidad en su comprensión y manejo. Esto permitió generar una herramienta tipo software distribuible con una muy buena resolución gráfica y entorno amigable de trabajo.
- El proceso de diseño según la metodología de anchos efectivos es, de por sí, un proceso dispendioso y más aún cuando se consideran efectos de refuerzos y perforaciones. La ventaja de visualizar paso a paso y variable por variable, el proceso de diseño, incluida las iteraciones de transición entre la geometría inicial y la geometría modificada, hizo que se eligiera una herramienta de fácil manejo y versatilidad como MS Excel.
- El método propuesto para la estimación de carga considerando el modelo de distribución del refuerzo, también propuesto en esta investigación, así como las indicaciones reportadas en la literatura, arroja como resultado estimaciones de carga proporcionales a la que arrojaría la normativa aplicada a perfiles corrientes. Esto permite concluir que el método propuesto a la luz del alcance de esta investigación tiene una confiabilidad similar a la que tiene la norma respecto a los perfiles corrientes.

6.2 Recomendaciones

- La herramienta desarrollada para estimar la capacidad portante se calibró a partir de modelos por elementos finitos con un rango limitado de variables, por tal motivo es necesario verificar los resultados en condiciones extremas geométricas.
- Debido a las limitaciones de alcance y técnicas del proyecto se utilizaron dos perfiles básicos utilizados en estantería, se podrán realizar con la misma metodología y será necesario realizar las respectivas calibraciones.
- La herramienta si bien toma en cuenta las condiciones de apoyo de acuerdo con el factor de modificación de la longitud efectiva, todas las validaciones se realizaron con apoyos completamente restringidos.
- La metodología, aunque tiene en cuenta los efectos de restricción al pandeo de la barra debido a la soldadura, requiere de calibración teniendo en cuenta los efectos que pudiera tener sobre las partes plana y curva del perfil de lámina delgada, la zona afectada por el calor.

6.3 Trabajos Futuros

- El primer trabajo inmediatamente posterior a este es el desarrollo de un plan experimental para la comparación de los resultados analíticos propuestos y los modelos de elementos finitos.
- En el presente trabajo se Desarrolló una propuesta de accesorios para realizar ensayos no solo en condiciones de restricción en los apoyos sino para realizar en ensayos a compresión articulados.
- Estudio completo para analizar la interacción entre el perfil y la barra de refuerzo, estudiando las opciones disponibles para la unión, y comparando las ventajas y desventajas de cada propuesta. Se sugiere prestar especial atención a la soldadura y su efecto en la lámina delgada.
- En este trabajo se tomó como base para el análisis de la sección el método de anchos efectivos (MAE), sin embargo, es posible utilizar otros métodos que pueden ser una alternativa para la estimación de cargas a compresión en perfiles de lámina delgada reforzados y no reforzados con barras, aplicando los principios de adaptación geométrica planteados en este trabajo. Entre otros métodos disponibles están la teoría de viga generalizadas (GBT, por sus siglas en inglés, Generalized Beam theory) y Método de los elementos finitos restringido (cFEM, por sus siglas en inglés, Constrained Finite Element Method).
- Inclusión de perfiles más complejos, que son utilizados comercialmente, en el desarrollo de perfiles para estanterías.

- Incluir análisis de perfiles con agujeros en aletas y subelementos de aletas y labios.
- Realizar un estudio sobre el efecto de la soldadura sobre la parte plana y curva del perfil de lámina delgada que pudiera estar afectada por su aplicación. Identificar la mejor técnica y condiciones para limitar los posibles efectos nocivos.

7 BIBLIOGRAFÍA

- [1] YU, Wei-wen a Charles S DAVIS. Buckling behavior and post-buckling strength of perforated stiffened compression elements. 1970.
- [2] HANCOCK, Gregory J. Distorsional Buckling of steel Storage Rack Columns. *Journal of Structural Engineering*. 1985, vol. 111, č. 12, s. 2770–2783.
- [3] GARY, Carl a Robert J EGNER. United States Patent [191. 1978, s. 2–7.
- [4] CHOU, S.M. a J. RHODES. Review and compilation of experimental results on thin-walled structures. *Computers & Structures* [online]. 1997, vol. 65, č. 1, s. 47–67 Recuperado de. ISSN 00457949. Recuperado de: doi:10.1016/S0045-7949(96)00337-9
- [5] MICHAEL DAVIES, J., Philip LEACH a Angela TAYLOR. The design of perforated cold-formed steel sections subject to axial load and bending. *Thin-Walled Structures* [online]. 1997, vol. 29, pag.. 1–4, s. 141–157. ISSN 0263-8231. Recuperado de: doi:http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8231(97)00024-4
- [6] GODLEY, M. H R, R. G. BEALE a X. FENG. Analysis and design of down-aisle pallet rack structures. *Computers and Structures* [online]. 2000, vol. 77, pag.. 4, s. 391–401. ISSN 00457949. Recuperado de: doi:10.1016/S0045-7949(00)00031-6
- [7] BALDASSINO, Nadia a Claudio BERNUZZI. Analysis and behaviour of steel storage pallet racks. *Thin-Walled Structures* [online]. 2000, vol. 37, pag.. 4, s. 277–304 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/S0263-8231(00)00021-5
- [8] ARANGO, Sergio, Alejandro PAZ a Maria del Pilar DUQUE. Propuesta metodológica para la evaluación del desempeño estructural de una estantería metálica. *Revista EIA*. 2009, vol. 12, s. 139–154.
- [9] SILVESTRE, N. a D. CAMOTIM. GBT-based distortional buckling formulae for thin-walled channel columns and beams. ... on Cold-Formed ... [online]. 2002, vol. I, pag.. Asinzs 4600, s. 68–83. Recuperado de: https://mospace.library.umsystem.edu/xmlui/handle/10355/30069
- [10] SCHAFER, B. W. Local, Distortional, and Euler Buckling of Thin-Walled Columns. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2002, vol. 128, pag.. 3, s. 289–299. ISSN 0733-9445. Recuperado de: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:3(289)
- [11] CASAFONT, Miquel, Frederic MARIMON a Maria Magdalena PASTOR. Calculation of pure distortional elastic buckling loads of members subjected to compression via the finite element method. *Thin-Walled Structures* [online]. 2009, vol. 47, pag.. 6–7, s. 701–729 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2008.12.001
- [12] HE, Ziqi a Xuhong ZHOU. Strength design curves and an effective width formula for

- cold-formed steel columns with distortional buckling. *Thin-Walled Structures* [online]. 2014, vol. 79, s. 62–70 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2014.02.004
- [13] FREITAS, a. M S, Flavio T. SOUZA a M. S R FREITAS. Analysis and behavior of steel storage drive-in racks. *Thin-Walled Structures* [online]. 2010, vol. 48, pag.. 2, s. 110–117. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2009.09.003
- [14] ECCHER, G., K.J.R. J R RASMUSSEN a R. ZANDONINI. Elastic buckling analysis of perforated thin-walled structures by the isoparametric spline finite strip method. *Thin-Walled Structures* [online]. 2008, vol. 46, pag.. 2, s. 165–191 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2007.08.030
- [15] ECCHER, G., K. J R RASMUSSEN a R. ZANDONINI. Linear elastic isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures. *Thin-Walled Structures* [online]. 2008, vol. 46, pag.. 3, s. 242–260. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2007.09.002
- [16] ECCHER, G., K.J.R. RASMUSSEN a R. ZANDONINI. Geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled structures. *Thin-Walled Structures* [online]. 2009, vol. 47, pag.. 2, s. 219–232 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2008.05.013
- [17] YAO, Zhenyu a Kim J.R. RASMUSSEN. Material and geometric nonlinear isoparametric spline finite strip analysis of perforated thin-walled steel structures—Analytical developments. *Thin-Walled Structures* [online]. 2011, vol. 49, pag.. 11, s. 1359–1373 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2011.06.004
- [18] CASAFONT, Miquel, Maria MAGDALENA PASTOR, Francesc ROURE a Teoman PEKÖZ. An experimental investigation of distortional buckling of steel storage rack columns. *Thin-Walled Structures* [online]. 2011, vol. 49, pag.. 8, s. 933–946 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2011.03.016
- [19] ROURE, F., M.M. M. PASTOR, M. CASAFONT a M.R. R. SOMALO. Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3. *Thin-Walled Structures* [online]. 2011, vol. 49, pag.. 1, s. 167–184 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2010.09.002
- [20] CRISAN, Andrei, Viorel UNGUREANU a Dan DUBINA. Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression. Part 1—Experimental investigations. *Thin-Walled Structures* [online]. 2012, vol. 61, s. 86–96 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2012.07.016
- [21] CASAFONT, Miquel, Magdalena PASTOR, Jordi BONADA, Francesc ROURE a Teoman PEKÖZ. Linear buckling analysis of perforated steel storage rack columns with the Finite Strip Method. *Thin-Walled Structures* [online]. 2012, vol. 61, s. 71–85 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2012.07.010
- [22] KULATUNGA, M.P. P. a M. MACDONALD. Investigation of cold-formed steel structural members with perforations of different arrangements subjected to compression loading. *Thin-Walled Structures* [online]. 2013, vol. 67, s. 78–87 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2013.02.014
- [23] SCHAFER, B W, Z LI a C D MOEN. Computational modeling of cold-formed steel. *Thin-Walled Structures* [online]. 2010, vol. 48, pag.. 10–11, s. 752–762. ISSN 02638231 (ISSN). Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2010.04.008

- [24] MOEN, Cristopher D. a B.W. SCHAFER. Elastic buckling of cold-formed steel columns and beams with holes. *Engineering Structures* [online]. 2009, vol. 31, pag.. 12, s. 2812–2824 [vid. 2. březn 2016]. ISSN 01410296. Recuperado de: doi:10.1016/j.engstruct.2009.07.007
- [25] YAO, Zhenyu a Kim J.R. R RASMUSSEN. Inelastic local buckling behaviour of perforated plates and sections under compression. *Thin-Walled Structures* [online]. 2012, vol. 61, s. 49–70 Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2012.07.002
- [26] KALAVAGUNTA, Sreedhar, Sivakumar NAGANATHAN, Kamal NASHARUDDIN a Bin MUSTAPHA. Axially Loaded Steel Columns Strengthened with CFRP. 2014, vol. 8, pag.. 1, s. 58–69.
- [27] SILVESTRE, Nuno, Ben YOUNG a Dinar CAMOTIM. Non-linear behaviour and load-carrying capacity of CFRP-strengthened lipped channel steel columns. *Engineering Structures* [online]. 2008, vol. 30, pag.. 10, s. 2613–2630. ISSN 01410296. Recuperado de: doi:10.1016/j.engstruct.2008.02.010
- [28] HAEDIR, Jimmy a Xiao Ling ZHAO. Design of short CFRP-reinforced steel tubular columns. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 2011, vol. 67, pag.. 3, s. 497–509. ISSN 0143974X. Recuperado de: doi:10.1016/j.jcsr.2010.09.005
- [29] ACHARYA, Sandesh Raj. Reinforcement Schemes for Cold-Formed Steel Joists Having Web Openings. 2009.
- [30] SIVAKUMARAN, K.S. Reinforcement Schemes for CFS Joists Having Web Openings Research Report [online]. 2008. Recuperado de: doi:10.1080/0950069032000070342
- [31] MADUGULA, M. K. S., T. S. PRABHU a M. C. TEMPLE. Ultimate strength of concentrically loaded cold-formed angles. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 1983, vol. 10, s. 60–68.
- [32] YOUNG, Ben. Experimental Investigation of Cold-Formed Steel Lipped Angle Concentrically Loaded Compression Members. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2005, vol. 131, pag.. September, s. 1390–1396. Recuperado de: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:9(1390) CE
- [33] YOUNG, Ben a Ehab ELLOBODY. Buckling Analysis of Cold-Formed Steel Lipped Angle Columns. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2005, vol. 131, pag.. October, s. 1570–1579. ISSN 0733-9445. Recuperado de: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2005)131:10(1570)
- [34] SHI, G., Z. LIU, Y. ZHANG, Y.-Q. WANG a Y.-J. SHI. Study on the relationship of local buckling behavior of steel equal angle members under axial compression with the steel strength. *Gongcheng Lixue/Engineering Mechanics* [online]. 2012, vol. 29, pag.. 8. ISSN 10004750. Recuperado de: doi:10.6052/j.issn.1000-4750.2010.10.0724
- [35] SHIFFERAW, Y. a B. W. SCHAFER. Cold-formed steel lipped and plain angle columns with fixed ends. *Thin-Walled Structures* [online]. 2014, vol. 80, s. 142–152. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2014.03.001
- [36] LAU, S.C.W. a G.J. HANCOCK. Inelastic buckling of channel columns in the distortional mode. *Thin-Walled Structures* [online]. 1990, vol. 10, pag.. 1, s. 59–84

- Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/0263-8231(90)90005-J
- [37] YAP, Derrick C. Y. a Gregory J. HANCOCK. Experimental Study of High-Strength Cold-Formed Stiffened-Web C-Sections in Compression. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2011, vol. 137, pag.. 2, s. 162–172. ISSN 0733-9445. Recuperado de: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0000271
 - [38] LAU, By Sammy C W a Gregory J HANCOCK. Distorsional Buckling Formulas For Channel Columns. *Journal of Numerical Mathematics*. 1987, vol. 113, pag.. 5, s. 1063–1078. ISSN 0733-9445/87/0005-1063.
 - [39] LAU, Sammy C.W. a Gregory J HANCOCK. Distortional Buckling Formulas For Channel Columns. *Journal of Structural Engineering*. 1987, vol. 113, pag.. 5, s. 1063–1078.
 - [40] YOUNG, Ben a Kim J.R. RASMUSSEN. Design of lipped channel columns. *Journal of Structural Engineering* [online]. 1998, vol. 124, pag.. 2, s. 140–148. ISSN 07339445 (ISSN). Recuperado de: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1998)124:2(140)
 - [41] YOUNG, Ben a Jintang YAN. Channel Columns Undergoing Local, Distortional, and Overall Buckling. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2002, vol. 128, pag.. 6, s. 728–736. ISSN 0733-9445. Recuperado de: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:6(728)
 - [42] KULATUNGA, M. P., M. MACDONALD, J. RHODES a D. K. HARRISON. Load capacity of cold-formed column members of lipped channel cross-section with perforations subjected to compression loading - Part I: FE simulation and test results. *Thin-Walled Structures* [online]. 2014, vol. 80, s. 1–12. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2014.02.017
 - [43] SCHAFER, B. W. Local, Distortional, and Euler Buckling of Thin-Walled Columns. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2002, vol. 128, pag.. 3, s. 289–299. ISSN 0733-9445. Recuperado de: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2002)128:3(289)
 - [44] LECCE, M a K J R RASMUSSEN. Distortional buckling of cold-formed stainless steel sections: Experimental investigation. *Journal of Structural Engineering* [online]. 2006, vol. 132, pag.. 4, s. 497–504. ISSN 07339445 (ISSN). Recuperado de: doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(2006)132:4(497)
 - [45] KWON, Young Bong, Bong Sun KIM a Gregory J. HANCOCK. Compression tests of high strength cold-formed steel channels with buckling interaction. *Journal of Constructional Steel Research* [online]. 2009, vol. 65, pag.. 2, s. 278–289. ISSN 0143974X. Recuperado de: doi:10.1016/j.jcsr.2008.07.005
 - [46] JAKAB, Gábor. Analysis And Design Of Cold-Formed C-Section Members And Structures. B.m., 2009. b.n.
 - [47] MEIYALAGAN, M. Investigation on Cold formed C section Long Column with Intermediate Stiffener & Corner Lips–Under Axial Compression. *International Journal of ...* [online]. 2010, vol. 1, s. 28–41. Recuperado de: <http://www.indianjournals.com/ijor.aspx?target=ijor:ijaerd&volume=1&issue=1&article=003>
 - [48] KALAVAGUNTA, Sreedhar, Sivakumar NAGANATHAN a Kamal Nasharuddin Bin MUSTAPHA. Experimental study of axially compressed cold formed steel channel columns. *Indian Journal of Science and Technology*. 2013, vol. 6, pag.. 4, s. 4249–

4254. ISSN 09746846.
- [49] CASAFONT RIBERA, Miquel, Guillermo REYES POZO, Francesc FERRANDO PIERA, Francisco ROURE FERNANDEZ a Jordi BONADA BO. Anàlisi del comportament a compressió de perfils prims oberts d'acer conformats en fred. B.m., 2013. b.n.
- [50] KUBIAK, Tomasz. Static and Dynamic Buckling of Thin-Walled Plate Structures [online]. 2013. ISBN 3319006541. Recuperado de: doi:10.1007/978-3-319-00654-3
- [51] BERNUZZI, Claudio a Marco SIMONCELLI. European design approaches for isolated cold-formed thin-walled beam-columns with mono-symmetric cross-section. Engineering Structures [online]. 2015, vol. 86, s. 225–241. ISSN 0141-0296. Recuperado de: doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.12.040
- [52] DINIS, Pedro. Local-Plate and Distortional Post- Buckling Behavior of Cold Formed Steel Columns : Elastic and Elastic-Plastic Fem. 2016, pag.. September.
- [53] SIVAKUMARAN, K.S. a Nabil ABDEL-RAHMAN. A finite element analysis model for the behaviour of cold-formed steel members. Thin-Walled Structures [online]. 1998, vol. 31, s. 305–324. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/S0263-8231(98)00017-2
- [54] PU, Y, M H R GODLEY, R G BEALE a H H LAU. Prediction of ultimate capacity of perforated lipped channels. Journal of Structural Engineering [online]. 1999. ISSN 07339445 (ISSN). Recuperado de: doi:doi:10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:5(510)
- [55] MOEN, Cristopher D. a B. W. SCHAFER. Experiments on cold-formed steel columns with holes. Thin-Walled Structures [online]. 2008, vol. 46, pag.. 10, s. 1164–1182. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2008.01.021
- [56] CAPARRÓS MARTÍNEZ, Juan Francisco. Estudio de perfiles perforados de chapa conformada en frío mediante el método de las bandas finitas [online]. B.m.: Universitat Politècnica de Catalunya. 1. řijen 2011 [vid. 24. březen 2016]. Recuperado de: http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/14857
- [57] ROURE, F., M. M. PASTOR, M. CASAFONT a M. R. SOMALO. Stub column tests for racking design: Experimental testing, FE analysis and EC3. Thin-Walled Structures [online]. 2011, vol. 49, pag.. 1, s. 167–184. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2010.09.002
- [58] UNGUREANU, Viorel a Dan DUBINA. Sensitivity to imperfections of perforated pallet rack sections. Mechanics and Mechanical Engineering. 2013, vol. 17, pag.. 2, s. 207–220. ISSN 14281511.
- [59] SZABO, Iosif F. a Dan DUBINA. Recent research advances on the ECBL approach. Part II: Interactive buckling of perforated sections. Thin-Walled Structures [online]. 2004, vol. 42, pag.. 2, s. 195–210. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/S0263-8231(03)00057-0
- [60] CRISAN, Andrei, Viorel UNGUREANU a Dan DUBINA. Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression: Part 2—numerical investigations and design considerations. Thin-Walled Structures [online]. 2012, vol. 61, s. 97–105. Recuperado de. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2012.07.013

- [61] CRISAN, Andrei, Viorel UNGUREANU a Dan DUBINA. Behaviour of cold-formed steel perforated sections in compression. Part 1 - Experimental investigations. Thin-Walled Structures [online]. 2012, vol. 61, s. 86–96. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2012.07.016
- [62] YAO, Zhenyu, D PH, Kim J R RASMUSSEN a M ASCE. Perforated Cold-Formed Steel Members in Compression . I : Parametric Studies [online]. 2011, s. 1–15. ISSN 07339445. Recuperado de: doi:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001635.
- [63] KULATUNGA, M. P. a M. MACDONALD. Investigation of cold-formed steel structural members with perforations of different arrangements subjected to compression loading. Thin-Walled Structures [online]. 2013, vol. 67, s. 78–87. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2013.02.014
- [64] NEDELCU, Mihai. Buckling mode identification of perforated thin-walled members by using GBT and shell FEA. Thin-Walled Structures [online]. 2014, vol. 82, s. 67–81. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2014.04.005
- [65] REN, C. a X. ZHAO. Influence of diagonal bracing restraint on cold-formed steel perforated columns under axial compression. 22nd International Specialty Conference on Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction. 2014, s. 601–615.
- [66] SMITH, Frank H. a Cristopher D. MOEN. Finite strip elastic buckling solutions for thin-walled metal columns with perforation patterns. Thin-Walled Structures [online]. 2014, vol. 79, s. 187–201. Recuperado de: ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2014.02.009
- [67] BONADA, J., M. CASAFONT, F. ROURE a M.M. PASTOR. Selection of the initial geometrical imperfection in nonlinear FE analysis of cold-formed steel rack columns. Thin-Walled Structures [online]. 2012, vol. 51, pag.. Febrero 2012, s. 99–111 [vid. 24. března 2016]. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2011.10.003
- [68] ZHUGE, Yan, Julie E. MILLS a Xing MA. Modelling of steel lattice tower angle legs reinforced for increased load capacity. Engineering Structures [online]. 2012, vol. 43, s. 160–168. ISSN 01410296. Recuperado de: doi:10.1016/j.engstruct.2012.05.017
- [69] SIVAKUMARAN, K S, Ming Yin NG a Steven R FOX. Flexural strength of cold-formed steel joists with reinforced web openings. Canadian Journal of Civil Engineering [online]. 2006, vol. 33, pag.. 9, s. 1195–1208. ISSN 0315-1468. Recuperado de: doi:10.1139/I06-064
- [70] ICONTEC, INSTITUTO COLOMBIANO DE NORMAS TECNICAS Y CERTIFICACION. NTC 5689 Especificación para el Diseño, ensayo y utilización de estanterías industriales de acero. 2009.
- [71] PEKÖZ, T, G KIYMAZ, M CASAFONT, M M PASTOR a J BONADA. Design of perforated industrial storage rack columns for distortional buckling. 21st International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures - Recent Research and Developments in Cold-Formed Steel Design and Construction [online]. 2012, s. 437–454. Recuperado de: <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84873351390&partnerID=40&md5=afaf12c7476bd969104a92a0caf70cb3>
- [72] DINIS, Pedro B., Ben YOUNG a Dinar CAMOTIM. Local-distortional interaction in cold-formed steel rack-section columns. Thin-Walled Structures [online]. 2014, vol. 81, s. 185–194. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2013.09.010

- [73] WORLD WIDE MATERIAL HANDLING INC. Existing Frame Data Sheet [online]. B.m.: Worldwide Material Handling. Recuperado de: <http://www.wwmh.net/document-library/rack-repair-form/>
- [74] BAMBACH, M. R., H. H. JAMA a M. ELCHALAKANI. Axial capacity and design of thin-walled steel SHS strengthened with CFRP. *Thin-Walled Structures* [online]. 2009, vol. 47, pag.. 10, s. 1112–1121. ISSN 0263-8231. Recuperado de: [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2008.10.006](http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2008.10.006)
- [75] KALAVAGUNTA, Sreedhar, Sivakumar NAGANATHAN a Kamal Nasharuddin BIN MUSTAPHA. Proposal for design rules of axially loaded CFRP strengthened cold formed lipped channel steel sections. *Thin-Walled Structures* [online]. 2013, vol. 72, s. 14–19 [vid. 2. prosinec 2015]. ISSN 02638231. Recuperado de: [doi:10.1016/j.tws.2013.06.006](http://dx.doi.org/10.1016/j.tws.2013.06.006)
- [76] STEEL KING INC. Products Guide [online]. 1999. Recuperado de: <http://discovery.ucl.ac.uk/155707/>
- [77] URMSON, Christopher R a John B MANDER. Local buckling analysis of longitudinal reinforcing bars. *Journal of Structural Engineering* VO - 138 [online]. 2012, pag.. 1, s. 62. ISSN 0733-9445. Recuperado de: <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=edsgao&AN=edsgcl.282741902&lang=es&site=eds-live>
- [78] MASSONE, Leonardo M. a Daniel MORODER. Buckling modeling of reinforcing bars with imperfections. *Engineering Structures* [online]. 2009, vol. 31, pag.. 3, s. 758–767. ISSN 01410296. Recuperado de: [doi:10.1016/j.engstruct.2008.11.019](http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2008.11.019)
- [79] PEKOZ, John a Teoman WINTER. Interaction of postcritical plate buckling with overall column buckling of thin-walled members. 1972.
- [80] AIS, Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica. Reglamento Colombiano De Construcción Sismo Resistente - Nsr 10 [online]. 2010. Recuperado de: <http://www.actiweb.es/jorgeluisguesso/archivo1.pdf>
- [81] YU, Wei Wen a Roger LABOUBE. Cold-formed steel design. [online]. B.m.: Estados Unidos John Wiley & Sons, c2010, 2010. ISBN 0471348090. Recuperado de: <http://ezproxy.unal.edu.co/login?url=http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=cat02704a&AN=unc.000591582&lang=es&site=eds-live>
- [82] EUROPEAN COMMISSION a P SALMI. Design Rules For Cold Formed Structural Hollow Sections. 2003.
- [83] INSTITUTE, American Iron and Steel. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. 2007.
- [84] ARME S.A. Ficha tecnica Fleje de Acero Bajo Carbono Laminado en frio. 2005
- [85] ASM INTERNATIONAL. ASM Metals HandBook Volume 14B. 2006. ISBN 13: 978-0-87170-710-9.
- [86] BONADA, J, M M PASTOR, F ROURE a M CASAFONT. Influence of the cold work effects in perforated rack columns under pure compression load. *Engineering Structures* [online]. 2015, vol. 97, s. 130–139. ISSN 0141-0296. Recuperado de: [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.011](http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.04.011)
- [87] ROURE FERNÁNDEZ, F., M.M. PASTOR ARTIGUES, M. CASAFONT RIBERA, J.

- BONADA BO a OTHERS. Simulation of the Roll-Forming Process for the Determination of the Relevant Residual Stresses of Cold-Formed Steel Members. Strain [online]. 2011, s. 1–8. Recuperado de: <http://upcommons.upc.edu/handle/2117/6453>
- [88] BRYAN, C H. On the stability of a plate under thrust in its own plane. In: London Mathematical Society 22. 1891, s. 54–67.
- [89] TIMOSHENKO, Stephen a James GERE. Theory Of Elastic Stability. 2. vyd. Standford,: McGraw-Hill, 1963. ISBN 0-07-Y85831-7.
- [90] SCHUMAN, L a G BLACK. Strength of rectangular thin plates under edge compression. 1930.
- [91] VON KARMAN, T., E. E. SECHLER a L. H. DONNELL. The strength of thin plates in compression. Applied Mechanical. 1932, s. 54–53.
- [92] AISI- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. Specification for the Design of Light Gage Steel Structural Members. 1946
- [93] JIANG, Wenming, Zitian FAN, Defeng LIAO, Dejun LIU, Zhong ZHAO a Xuanpu DONG. Investigation of microstructures and mechanical properties of A356 aluminum alloy produced by expendable pattern shell casting process with vacuum and low pressure. Materials & Design [online]. 2011, vol. 32, pag.. 2, s. 926–934. ISSN 0261-3069. Recuperado de: [doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.015](http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.015)
- [94] AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. Design Flowchart for Using the 2007 Edition of the North American Cold-Formed Steel Specification and the 2008 Edition of the AISI Cold-Formed Steel Design Manual. Book. 2009.
- [95] SHIFFERAW, Yared, Luiz C. M. VIEIRA a Benjamin W. SCHAFER. Compression Testing of Cold-Formed Steel Columns with Different Sheathing Configurations. Proceedings of the Structural Stability Research Council - Annual Stability Conference. 2010, s. 593–612.
- [96] YOUNG, Ben a Kim J R RASMUSSEN. Shift of effective centroid of channel columns. Journal of Structural Engineering [online]. 1999, vol. 125, pag.. 5, s. 524–531. ISSN 07339445. Recuperado de: [doi:10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1999\)125:5\(524\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1999)125:5(524))
- [97] ZHAO, Xiao Ling a Lei ZHANG. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. Engineering Structures [online]. 2007, vol. 29, pag.. 8, s. 1808–1823. ISSN 01410296. Recuperado de: [doi:10.1016/j.engstruct.2006.10.006](http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.10.006)
- [98] AISI-S100. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. Aisi S100-2007. 2007.
- [99] AISI- AMERICAN IRON AND STEEL INSTITUTE. Cold-formed Steel Design Manual 2002. 2002.
- [100] GUNALAN, Shanmuganathan a Mahen MAHENDRAN. Experimental and numerical studies of fire exposed lipped channel columns subject to distortional buckling. Fire Safety Journal [online]. 2014, vol. 70, s. 34–45 [vid. 13. listopad 2017]. ISSN 0379-7112. Recuperado de: [doi:10.1016/J.FIRESAF.2014.08.018](http://dx.doi.org/10.1016/J.FIRESAF.2014.08.018)
- [101] SHANMUGAM, N. E., V. THEVENDRAN a Y. H. TAN. Design formula for axially compressed perforated plates. Thin-Walled Structures [online]. 1999, vol. 34, pag.. 1, s. 1–20. ISSN 02638231. Recuperado de: [doi:10.1016/S0263-8231\(98\)00052-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0263-8231(98)00052-4)

- [102] OBODAN, Natalia I., Vasiliu A. GROMOV a Olexandr G. LEBEDEYEV. Nonlinear behaviour and stability of thin-walled shells [online]. 2013. ISBN 9789400763647. Recuperado de: doi:10.1007/978-94-007-6365-4_1
- [103] HANCOCK, Gregory J. a Cao Hung PHAM. Buckling analysis of thin-walled sections under localised loading using the Semi-Analytical Finite Strip Method. Research Report - University of Sydney, Department of Civil Engineering [online]. 2014, vol. 86, pag.. 951, s. 1–25. ISSN 14412713. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2014.09.017
- [104] MALIKOV, Viatcheslav, Ralf OSSENBRINK, Bernd VIEHWEGER a Vesselin MICHAÏLOV. Investigation of air bending of structured sheet metals by multistage FE simulation [online]. 2012, s. 449–455. Recuperado de: doi:10.1007/s00170-012-3927-4
- [105] LLORENS MARTINEZ, Enric. Análisis de chapas trapezoidales de acero conformado en frío mediante el método de los elementos finitos [online]. B.m.: Universitat Politècnica de Catalunya. 1. duben 2013 [vid. 24. březem 2016]. Recuperado de: <http://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/20559>
- [106] MALITE, Associado Maximiliano. Análise Teórica E Experimental Submetidos À Compressão Gustavo Monteiro de Barros Chodraui. 2006.
- [107] MOEN, Christopher D. a B. W. SCHAFER. Elastic buckling of thin plates with holes in compression or bending. Thin-Walled Structures [online]. 2009, vol. 47, pag.. 12, s. 1597–1607. ISSN 02638231. Recuperado de: doi:10.1016/j.tws.2009.05.001
- [108] AENOR. Eurocódigo 3: Proyecto de estructuras de acero. Parte 1-4: Reglas generales. Reglas adicionales para los aceros inoxidables. 2012
- [109] BONADA, Jordi. Estudio teórico y experimental de los modos de pandeo de perfiles estructurales de acero de chapa delgada, conformados en frío, de sección abierta y con perforaciones sometidos a compresión. [online]. 2013, vol. 53, pag.. 9, s. 1689–1699. ISSN 1098-6596. Recuperado de: doi:10.1017/CBO9781107415324.004
- [110] Casafont Pastor Roure Peköz Design steel storage rack columns via direct strength method 2013.pdf

8 ANEXO A: Cargas en estanterías

Las cargas a las que está sometido un perfil de columna de estantería principalmente dependen de la configuración general de marco, de la configuración global de la estantería y de las condiciones de carga y la metodología de cálculo. Existen diferentes metodologías, con el fin de acotar las diferentes opciones se presentarán de forma general las diferentes cargas y metodologías de cálculo.

Tipos de cargas en estanterías

PL-Cargas de producto: Son referidas a las cargas verticales ocasionadas por el peso producto que se almacena junto con su estiba.

PL1-Parte de la carga PL usado para el cálculo del cortante sísmico.

DL- Cargas Muertas de la propia estantería: son cargas verticales ocasionadas por el peso propio de la estantería, incluye el peso de marcos, vigas, conexiones, escaleras, entre otras.

LL-Cargas vivas, son cargas debido a la necesidad de la operación con plataformas y en las diferentes normas RMI son del orden de 2.9kN/m^2 [8, 70].

EL-Carga sísmica, debidas a la aceleración del piso de soporte en el evento de un sismo y sus efectos sobre la estantería[70].

Existen otras cargas, pero no están involucradas en el alcance de este trabajo.

8.1 Combinaciones de cargas

Los códigos de fabricación y construcción de estructuras en los diferentes países donde existen disponen para los diseñadores diferentes métodos de cálculo. En Colombia se utiliza la Norma NTC5689 que presenta dos opciones de combinaciones de carga según las metodologías adoptadas por esta norma que puede escoger el diseñador, a saber:

Método de Diseño por Esfuerzos Admisibles (ASD)

Carga muerta crítica	DL	(8-1)
Carga de gravedad crítica	DL+LL+PL	(8-2)
Arrancamiento	DL-EL+PL1	(8-3)

Gravedad más fuerza sísmica crítica	DL+LL+EL+PL	(8-4)
Método de Diseño por factores de Carga y Resistencia (LRFD)		
Carga muerta	1.4DL+LL+1.2PL	(8-5)
Carga Viva /Producto	1.2DL+1.6LL+1.4PL	(8-6)
Carga sísmica	1.2DL+1.5EL+0.5LL+0.85PL	(8-7)
Arrancamiento	0.9DL-1.5EL+0.85PL	(8-8)

8.2 Aproximación a la solicitación de carga en un perfil tipo columna

Para realizar una aproximación teórica de las cargas a las que está sometido un perfil tipo columna, es necesario determinar las cargas a las que está sometida la estantería que lo contiene y evaluar con una metodología la combinación de cargas que lleva a la mayor solicitación el perfil.

Para esto, se toma una configuración de estantería, con valores de cargas específicos y utilizando un software de modelamiento estructural (SAP 2000) se evalúan las cargas con las diferentes combinaciones, obteniendo así un valor específico de cargas axiales, a cortante y momentos.

De acuerdo con el alcance de este trabajo solo se tomará las cargas axiales máximas a compresión.

9 ANEXO B: ESTIMACIÓN DE LA CAPACIDAD DE CARGAS MEDIANTE MEF

Se presentan aquí dos métodos de elementos finitos usados para comparar los resultados de la metodología propuesta.

9.1 Método de Elementos Finitos

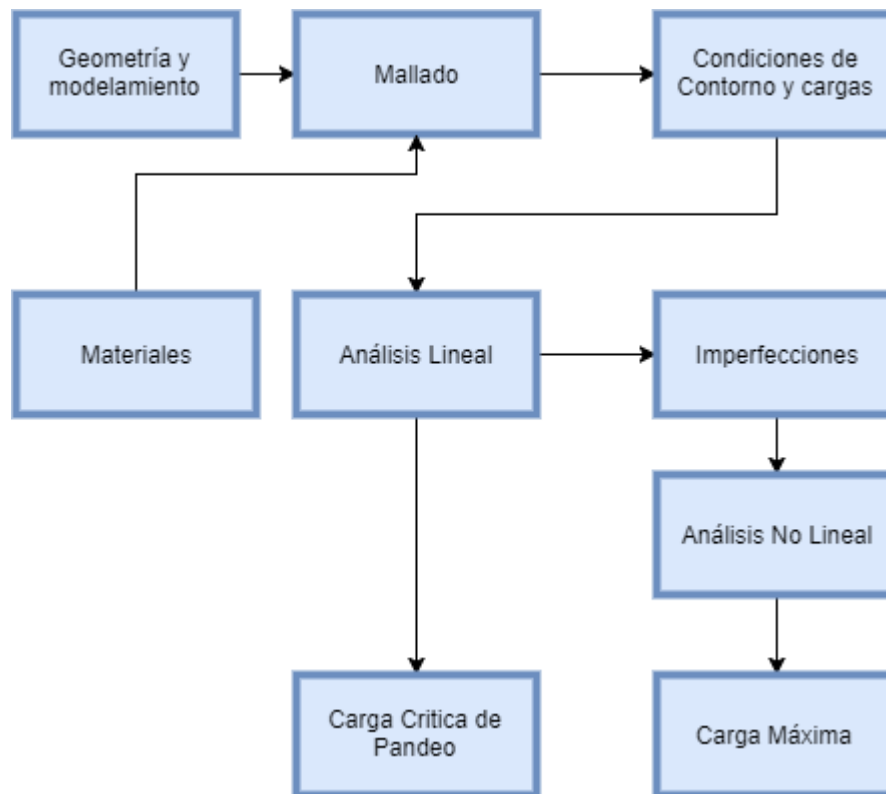
El método de elementos finitos es uno de los principales métodos para realizar análisis de estructuras, debido a versatilidad y multiplicidad de aplicaciones. De acuerdo con la complejidad de las estructuras es usual desarrollo algoritmos propios o usar software que ya tienen implementadas la mayoría de las soluciones más comunes. Para el alcance de esta investigación se utilizó el software ANSYS 16.0.

Se describirá inicialmente el problema del análisis de elementos a compresión y cómo desde los elementos finitos se obtiene una solución para identificar la carga máxima que puede soportar a compresión.

Por medio del software ANSYS se resuelven las ecuaciones numéricas de equilibrio necesarias en la formulación del problema de carga en perfiles de lámina delgada.

El Problema de carga a compresión en una placa o este caso un perfil constituido de diferentes placas consiste en identificar la carga crítica de compresión, usualmente llamado el pandeo en el rango lineal y después verificar en el rango no lineal como es el comportamiento a compresión y cuál es la carga máxima que soportaría.

Diversos métodos pueden usarse, más en diseño en lámina delgada es común un esquema de solución que se utiliza en las siguientes referencias [54, 95, 102–104]. La mayoría de las referencias son condensadas en un procedimiento que se puede ver la **Figura 9-1**, en el que se genera inicialmente a un problema lineal, y desde el cual se evalúan las cargas de pandeo y se realiza un post- proceso para obtener un resultado que tenga en cuenta tanto las no linealidades del material y del proceso del pandeo.

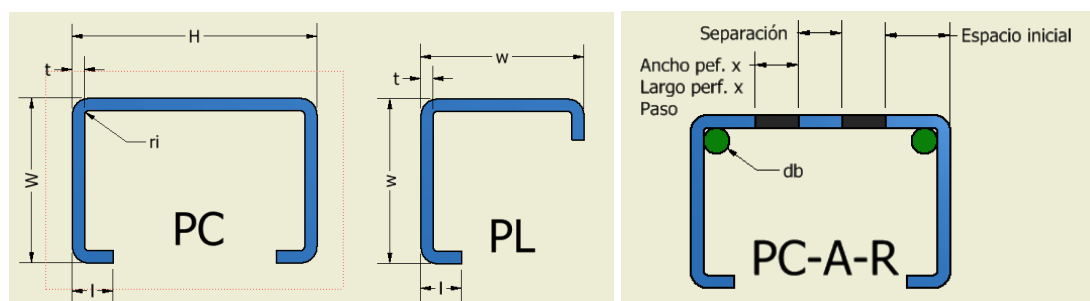
Figura 9-1: Esquema general de Estimación de carga en ANSYS. Fte Autor

Se realiza a continuación la descripción por cada paso del proceso.

9.2 Modelado de los perfiles y el refuerzo

El modelado de los perfiles se realiza teniendo en cuenta la importante opción de trabajar en lámina delgada con ANSYS, pudiendo utilizar dimensiones nominales que permiten facilitar la tarea de modelamiento.

Para los perfiles que se seleccionaron en esta investigación los perfiles tienen las dimensiones principales que se pueden ver en la **Figura 9-2**

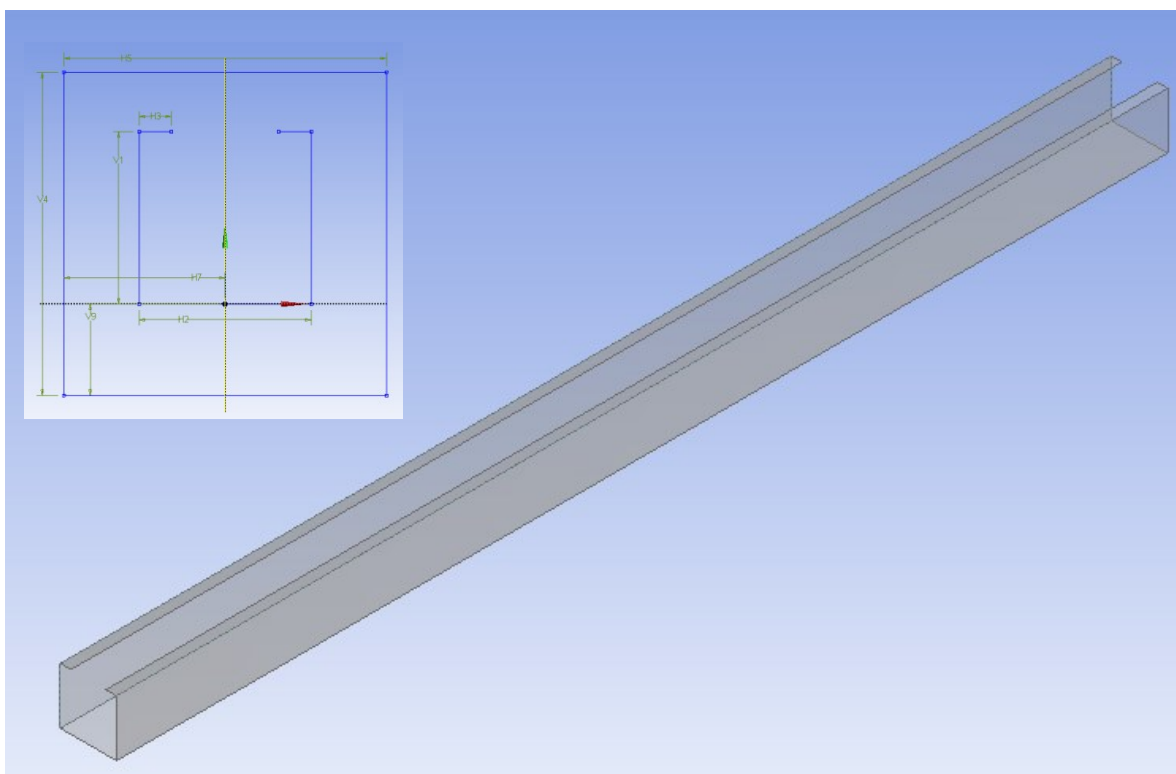
Figura 9-2: Esquema general de Estimación de carga en ANSYS. Fte Autor

Estos perfiles corresponden a tamaños estándar similares a los encontrados en comercialmente.

Los espesores de los materiales no superan los 8 mm y los perfiles pueden ser desde 50 mm de longitud hasta 4000m en aplicaciones de estanterías especiales. Para modelar los perfiles determinamos la línea media (por todo el centro del espesor).

El desarrollo geométrico en el entorno Workbench de ANSYS se puede apreciar de esta forma.

Figura 9-3: Esquema general de módulo de geometría en ANSYS



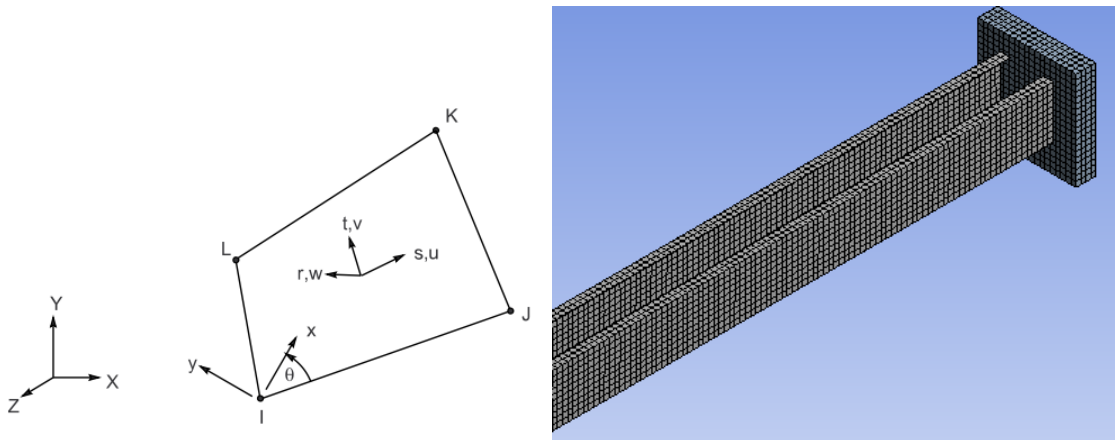
9.3 Mallado y tipo de elementos usados

El mallado de perfiles se realiza de acuerdo a las referencias utilizando elementos tipo Shell (Shell 181) [105][106][86] y en tamaños recomendados de entre 5 y 8 mm[56, 107]. Adicionalmente se realiza un análisis de convergencia para validar si el tamaño de los elementos utilizados permite lograr resultados adecuados y en el menor tiempo posible, resultando en tamaños de malla menores de 8 mm se encuentran variaciones menores al 1% en el resultado.

El elemento Shell 181 de ANSYS es un elemento tipo placa con 4 nodos, 6 grados de libertad, a cada nodo: desplazamientos en tres direcciones y rotaciones en los tres planos y es utilizado en grandes desplazamientos y rotaciones, en análisis lineal y no lineal. Se puede utilizar con integración reducida. Este elemento en el mallado permite que el labio rigidizador se someta a flexión y por ello necesita suficientes elementos lineales para obtener funcionales resultados del análisis [56]. El procedimiento de mallado es Mixto buscando que en las zonas planas se optimice el uso de elementos y en las curvas o próximo a los dobleces se utilice tipo quads.

Para poder generar las condiciones de contorno específicas se colocó el perfil de lámina delgada entre placas, muy similar a como se realizan los ensayos de este tipo de columnas, según NTC 5689. Para las placas se utilizaron elementos Solid 186 y para adaptar el contacto entre el perfil se definieron métodos de contacto con elementos tipo Conta 174 y Target 170.

Figura 9-4: Elemento Shell 181. Y Modelo mallado Fte Ansys Manual-



Para realizar el respectivo modelamiento se realizó un análisis de sensibilidad

9.4 Condiciones de contorno y cargas

Las condiciones de carga se buscan sean similares a las de los ensayos, por esta razón se aplicará una carga alineada con el centroide del perfil. Para tal fin se utilizan las placas de apoyo cuyo centroide está alineado con el centroide del perfil desde el desarrollo geométrico.

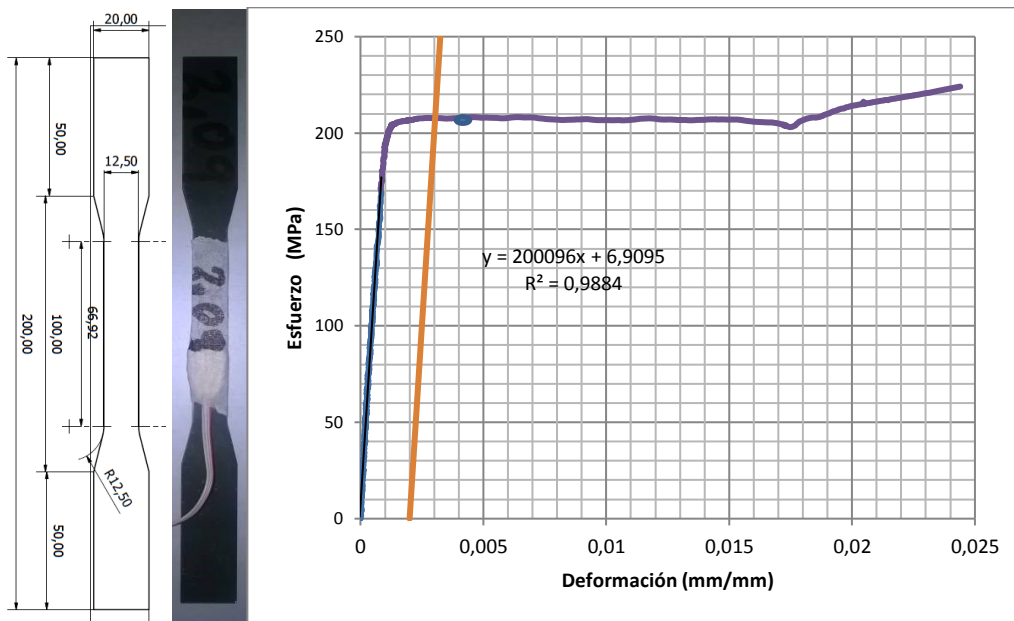
Las superficies externas de una de las placas se restringen en translación y rotación. Mientras tanto la placa opuesta solo tiene desplazamiento en la dirección del eje longitudinal del perfil, también se restringen las rotaciones de la placa móvil buscando que la carga siempre sea perpendicular al centroide del perfil.

En la primera fase, buscando la carga crítica de pandeo se determina una carga estándar, normalmente igual a la unidad.

9.5 Introducciones de las propiedades no lineales del material

En esta investigación se realizaron ensayos para caracterizar un material típico nacional. La primera tarea fue determinar las propiedades del acero por medio de ensayos y compararlas con la información técnica del fabricante del estante. Se usaron tres muestras rectangulares de 1/2 pulgada de ancho para hojas de acuerdo con ASTM 370-15 (vea la Figura 3) y corte por el método EDM para evitar cualquier defecto en el borde cortado. Los parámetros de prueba se ajustaron según ASTM370-15 (ASTM 2014) y ASTM E8 / E8M-15a (ASTM E8 2010) para determinar las propiedades de rendimiento en la máquina de prueba universal (UTM) Shimadzu con una celda de carga de 300 kN, un strain Gauge P3 M & M y un registrador para leer los datos de deformación del medidor de tensión. Velocidad de prueba: 0.5 mm/mm/min. Velocidad de lectura de datos: 1 datos / seg. Todo el equipo en el Laboratorio de Estructuras - Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de Colombia.

Figura 9-5: Geometría, probeta y resultado de ensayo.



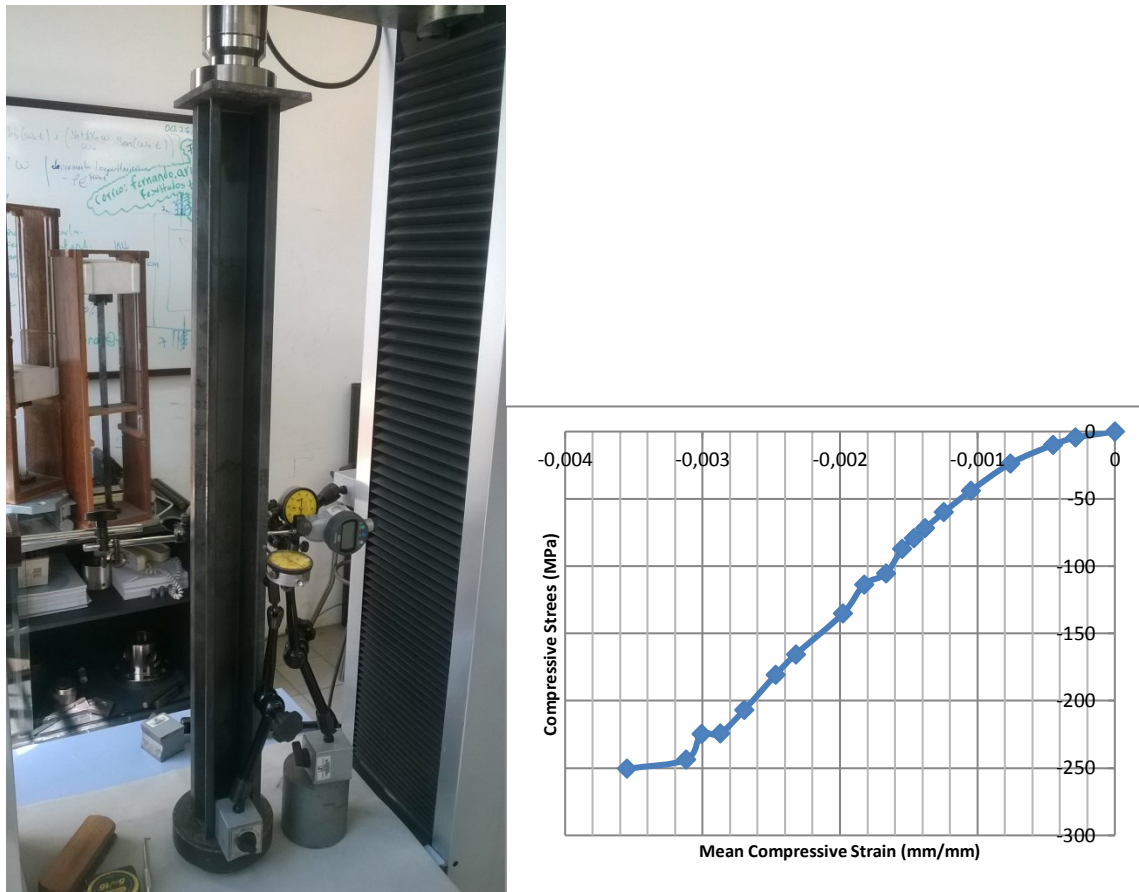
Con el fin de afinar la propuesta según una inquietud del autor se desarrolló una probeta que limitara la tendencia del momento flector que existe al probar esquinas. Para eso se desarrolló un montaje completo para 3 probetas y se realizaron modelos con el fin de verificar los resultados de la norma NSR sobre el aumento del esfuerzo por el trabajo en frío. Esto con el fin de evaluar la posibilidad geométrica de mejorar o reforzar la esquina.

En la gráfica de resultados se evidencia un aumento considerable en la fluencia 0.2%, y en la simulación se evidencia una disminución en la deformación perpendicular, en y, equivalente a un 10% de la deformación perpendicular.

Adicionalmente se realizó un ensayo de columna para estimar el orden de magnitud de las cargas a tratar, los resultados se pueden ver en el la grafica

La prueba del perfil permitió comprender al autor y correlacionarse más con los tipos de falla y el comportamiento tanto global como local del perfil.

Figura 9-7: Ensayo de estimación de cargas iniciales.



De la información colectada y de otra Fuentes[56] se pudieron completar los datos del material en el rango lineal y hasta el esfuerzo último. También se pudo determinar el orden de magnitud del desplazamiento del cabezal para poder alimentar el modelo no lineal.

Con el fin introducir el material y las linealidades se manejó un modelo bilineal de comportamiento con el esfuerzo de fluencia encontrado y un módulo tangente de 1500 MPa.

9.6 Análisis lineal

El análisis de pandeo por valores propios es una valiosa herramienta de ANSYS para poder estimar la carga crítica de pandeo de en el rango lineal y elástico. Este análisis es un modelo linealizado de estabilidad estática y el punto de bifurcación corresponde a la carga crítica de pandeo.

ANSYS formula el análisis de pandeo lineal mediante la solución de un problema de valores y vectores propios. Para eso realiza inicialmente una carga del sistema para generar la matriz de rigidez geométrica y se realiza un análisis estático.

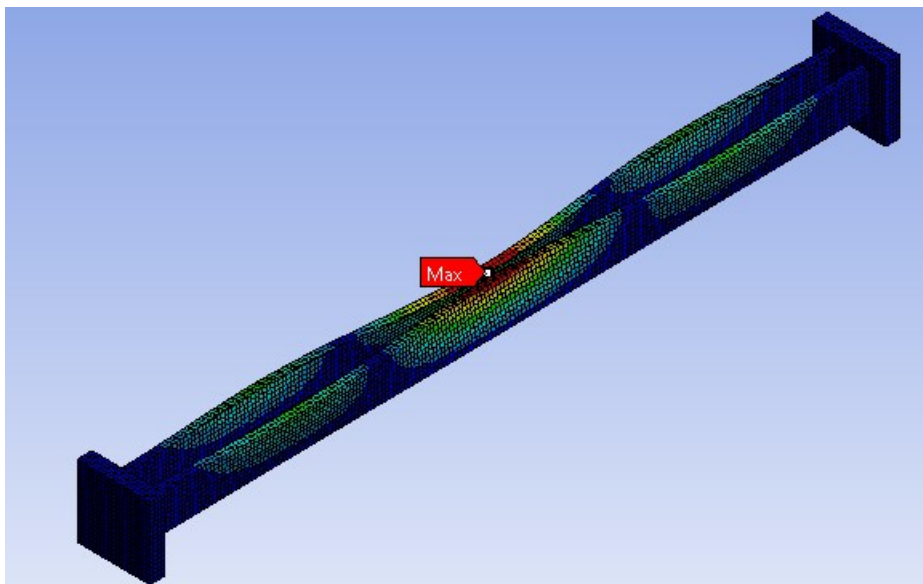
Seguidamente se plantea un problema teniendo en cuenta un factor λ , y se presenta esta ecuación:

$$F = \lambda.F_{ref} \Rightarrow K_{\sigma} = \lambda.K_{\sigma,ref}$$

Lo que permite que se evalúe los desplazamientos para cada nuevo valor de carga y adicionalmente se puedan evaluar las perturbaciones en cada variación de la carga. Se encuentra la carga crítica cuando se produce movimiento aunque no haya variación de carga.

$$(K + \lambda.K_{\sigma,ref}).\delta D = 0$$

Figura 9-8: Análisis de carga Crítica.



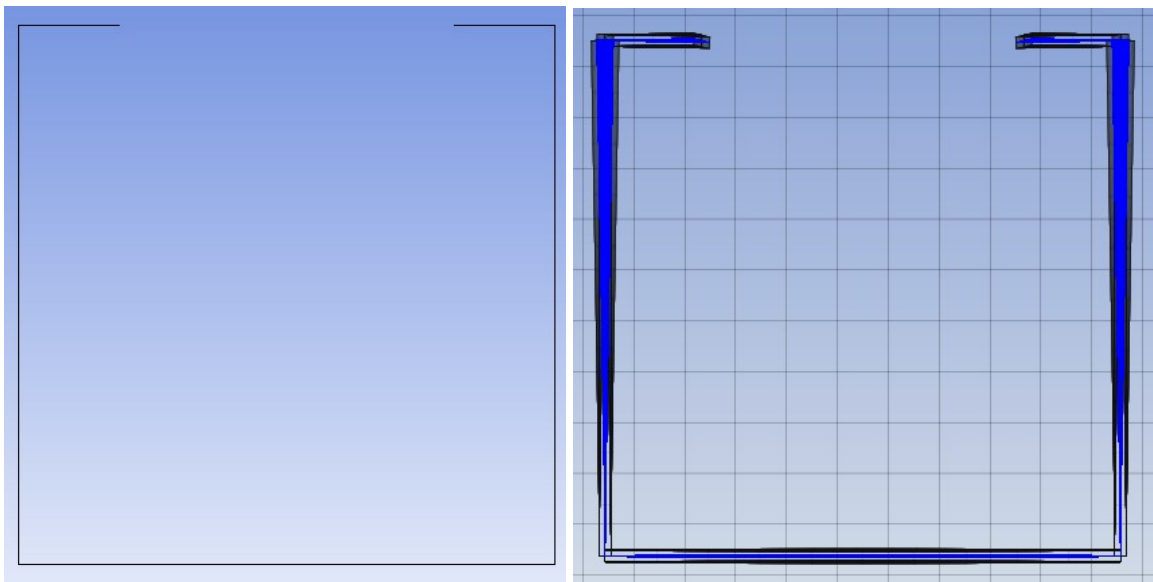
Esta ecuación determina los valores propios de pandeo al realizar el análisis lineal. Y se toma el modo que genera la menor carga. Para la obtención de estos valores propios ANSYS permite usar diferentes métodos, el más usado el método de Block Lanczos.

En este punto se tendrá como resultado un modelo deformado por la magnitud de la carga crítica. De este modelo deformado, se recuperan las trayectorias de deformación y se construye otro modelo el cual contiene las deformaciones factoradas, a este proceso le llama inclusión de no linealidades e imperfecciones.

9.7 Imperfecciones

Debido a que la carga lineal es tomada a partir de un modelo normalmente sin imperfecciones, es necesario generar un modelo que pueda tener en cuenta estas imperfecciones. Para eso lo primero es cuantificarlas y verificar que tanto afectan el modelo, trabajo que ya se ha realizado en varias fuentes [14, 25, 56, 62]. Han realizado análisis de imperfecciones y han encontrado que los modelos son muy sensibles a la magnitud de las imperfecciones. Y recomiendan valores como los siguientes de acuerdo con el modo de pandeo a estudiar. Magnitud de las imperfecciones según Eurocódigo 3 [108]: modo de pandeo local: (altura del alma del perfil/200); modo de pandeo distorsional: (altura de aletas del perfil/50); modo de pandeo global: (Longitud del perfil/200). Varias referencias que han utilizado estos valores indican que para el pandeo global estos valores de imperfecciones generan diferencias hasta de 20% y han obtenido mejores resultados con imperfecciones con valores de $L/200$, (Longitud del perfil/200). Tomando como base las indicaciones de la literatura [109] se toman de referencia imperfecciones con $L/1000$.

Figura 9-9: Geometría de la sección no deformada y deformada por imperfecciones.



En ANSYS esas imperfecciones se implementan activando comandos que utilizan la geometría deformada del análisis lineal, factorizan las deformaciones y se rearmar el modelo con las respectivas imperfecciones incluidas. Se utiliza el comando UPGEOM, habilitable en Workbench o en APDL. Como resultado se obtiene un modelo no lineal que al aplicarse la carga se comportará muy diferente al análisis elástico lineal y que en otras investigaciones ha tenido buena correlación con resultados experimentales.

9.8 Análisis No Lineal

El análisis no lineal más común es el Newton-Raphson y tiene como limitantes su sensibilidad a las suposiciones iniciales. “ANSYS utiliza el método Newton-Raphson completo para solucionar problemas no lineales. Se trata de un método mixto que consiste en aplicar alternativamente el método incremental y el método iterativo de Newton. El usuario administra las iteraciones y los incrementos de carga. Antes de cada solución, el método Newton-Raphson evalúa el vector de cargas que está fuera de equilibrio, que corresponde a la diferencia entre las fuerzas internas y las fuerzas aplicadas (externas). El programa realiza un cálculo lineal, utilizando estas cargas que provocan el desequilibrio, y seguidamente chequea la convergencia. Si los criterios de convergencia no se satisfacen, se recalcula el vector de cargas de desequilibrio, se actualiza la matriz de rigidez y se calcula una nueva solución. Este procedimiento iterativo continúa hasta que el problema converge”. [110]

Figura 9-10: Método de Newton Raphson.

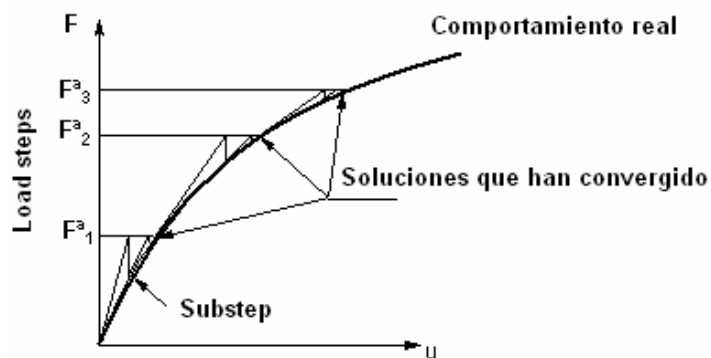


Figura 9-11: Esquema del proceso en el escritorio de Workbench de ANSYS.

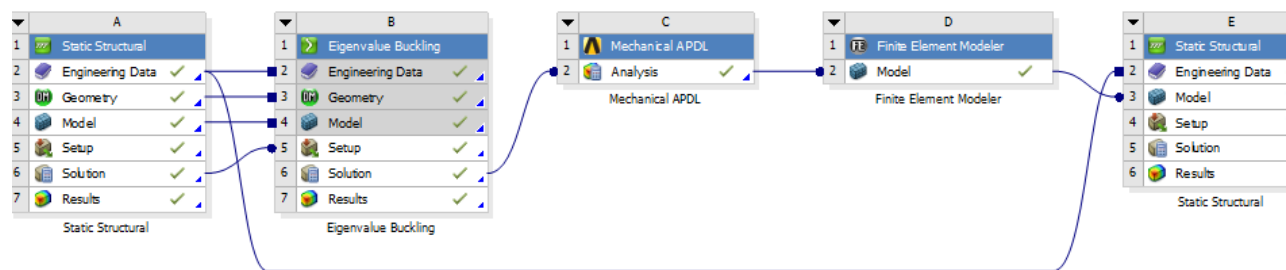
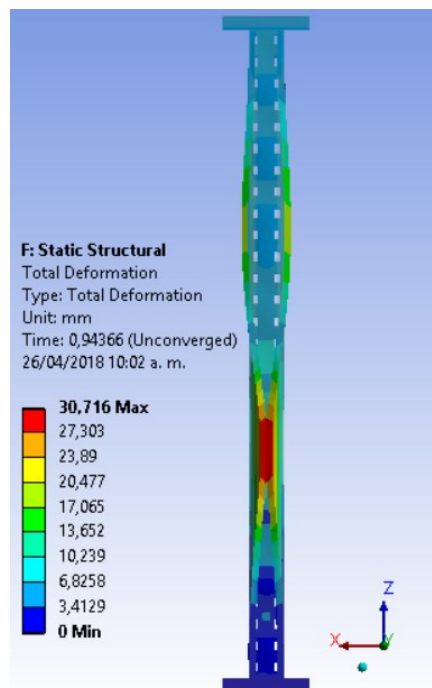
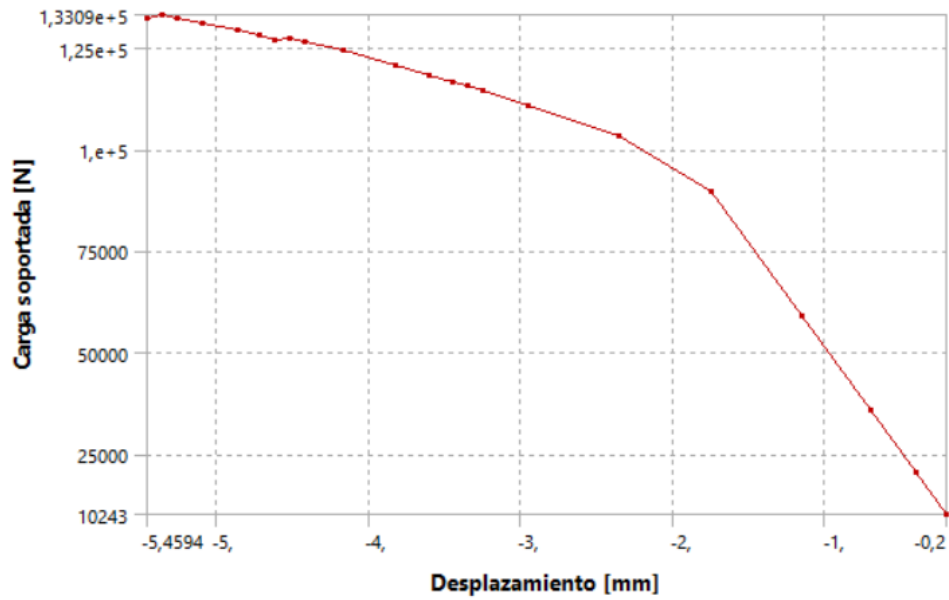


Figura 9-12: Resultados caso 6, Perfil C de altura 80 mm, Aleta 80 mm, labios iguales de 15 mm, espesor de 1,5 mm. Agujeros: Altura 32.40 mm: Ancho 19.05 mm, Separación: 26.5 mm Paso vertical: 51 mm. Sin refuerzo.



Los resultados de los perfiles seleccionados se presentan el capítulo 5.

10 ANEXO C: Herramientas Desarrolladas

10.1 MATLAB. Herramienta para calcular las propiedades de un perfil e incluir la geometría de las barras

La herramienta desarrollada en MATLAB permite al usuario transformar geoméricamente la sección de un perfil en lámina delgada con refuerzo por barras en las esquinas del alma a un perfil de lámina delgada únicamente, donde las barras se reemplazan por un elemento en lámina delgada de espesor diferente, conservando el centroide original del perfil reforzado.

Se utilizaron 3 geometrías básicas utilizadas en Estanterías, Perfil C, Perfil Omega y Perfil Omega rigidizado en el alma (rigidizador intermedio), ver **Figura 10-1**. La sección con refuerzo se representa en la **Figura 10-2**. La herramienta permite escoger cualquiera de estas opciones y coleccionar sus datos de geometría.

Figura 10-1: Perfiles sin refuerzo seleccionados para realizar adaptaciones geométricas. Izquierda, Perfil C; Centro, Perfil Omega; Derecha, Perfil Omega Rigidizado. Fte. Autor.

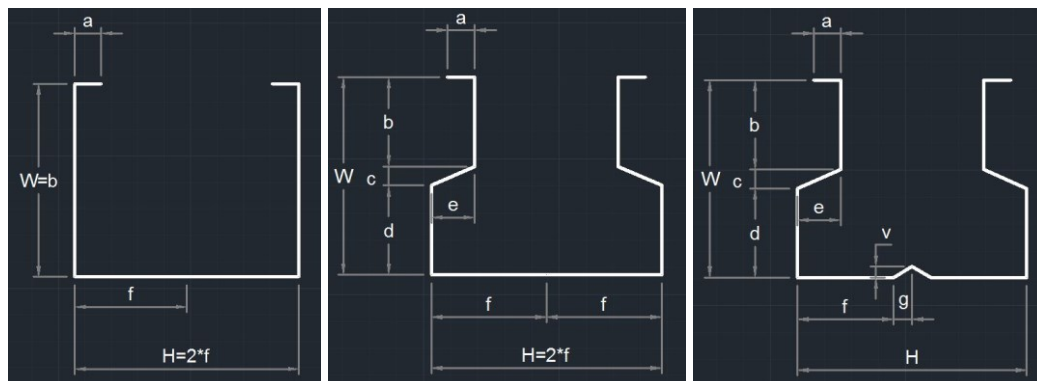
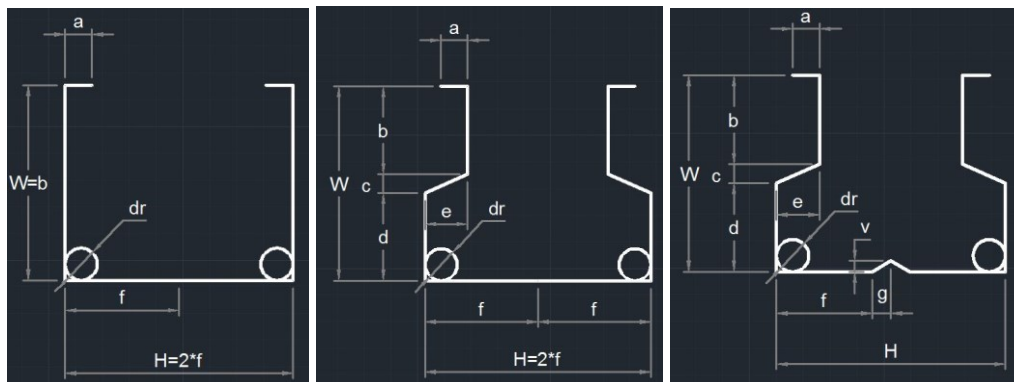
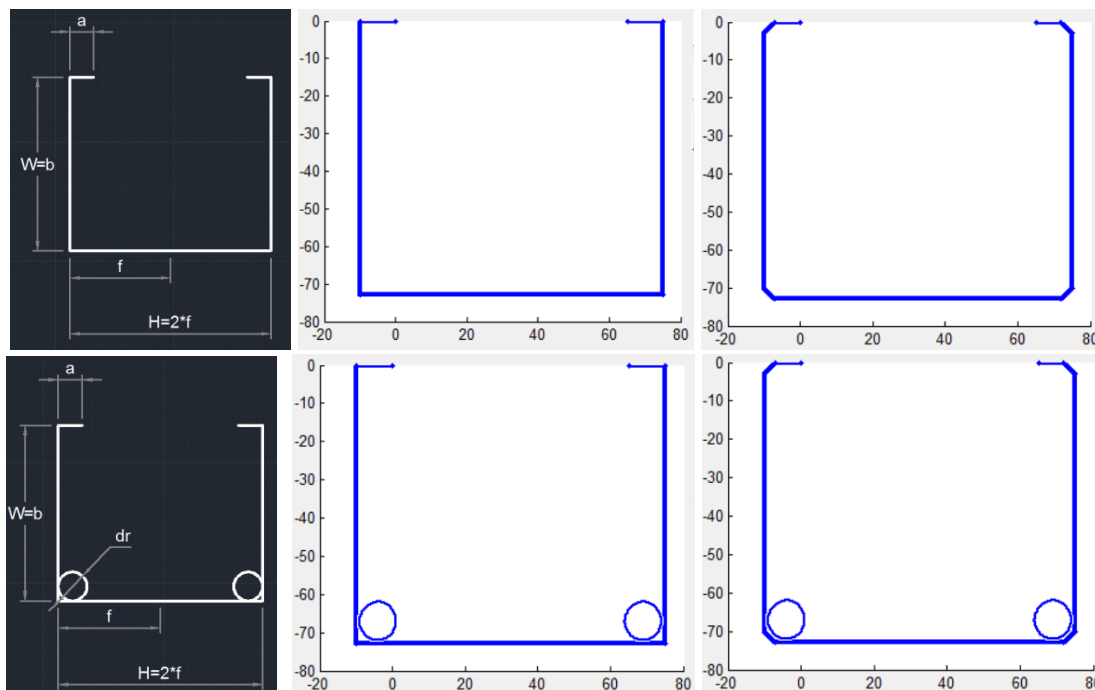


Figura 10-2: Perfiles con refuerzo seleccionados para realizar adaptaciones geométricas. Izquierda, Perfil C reforzado; Centro, Perfil Omega reforzado; Derecha, Perfil Omega Reforzado. Fte. Autor.



Tiene dos opciones para acoger la representación, a saber: no teniendo en cuenta los dobleces y usando los lados del perfil como si los radios de doblez fueran muy pequeños o teniendo en cuenta los radios de dobles y transformándolos en un elemento recto. A estas opciones se les denominó: Modelo de línea Media sin doblez y Modelo de línea media con Doble, respectivamente. La herramienta prevvisualiza de acuerdo con la selección del usuario y la geometría solicitada como se evidencia en la **Figura 10-3** primera fila para perfil C sin refuerzo.

Figura 10-3: Perfil C sin refuerzo (primera fila) y con refuerzo (segunda fila) representado por la herramienta: Izquierda, Perfil C guía; Centro, Perfil C representado con Modelo de línea Media sin doblez; Derecha, Perfil C representado con Modelo de línea Media con doblez. Fte. Autor.

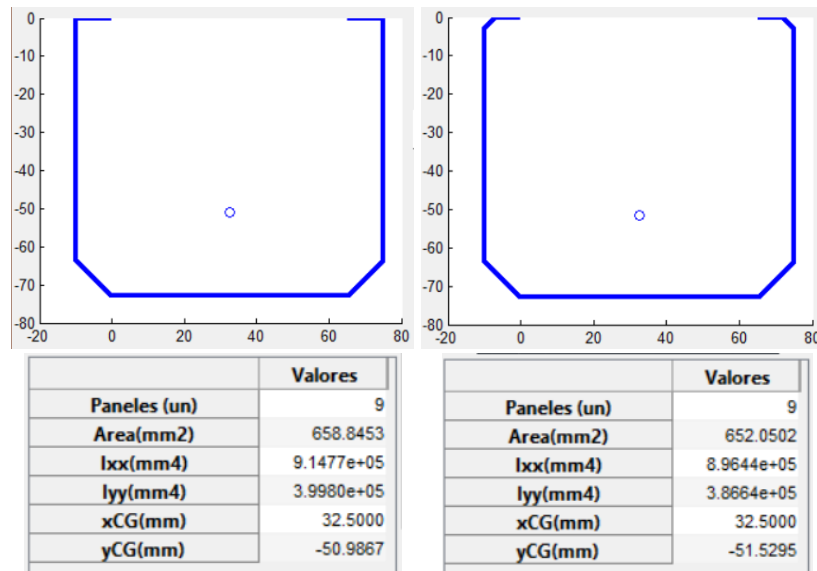


Se desarrollaron con estos dos modelos porque algunos procesos de Diseño pueden requerir la obtención de las propiedades de la sección de cualquiera de las dos formas.

En el caso del perfil con refuerzo, la herramienta incluye el refuerzo en la representación y permite seleccionar la forma de representarlos, como se aprecia en la **Figura 10-3** segunda fila.

Luego de previsualizar el usuario puede ajustar los datos y repetir el ciclo. Luego el usuario le puede solicitar al programa que realice la transformación de la sección reforzada en una sección con elemento esquina de espesor mayor que incluye la geometría del refuerzo. Esta inclusión se realiza conservando el centroide de la zona en la esquina y así mismo conservando el centroide de toda la sección, lo anterior de acuerdo con la propuesta del modelo que se estudió en la sección 3.5. La herramienta calcula la posición del centroide de toda la sección transformada, los momentos de inercia principales y la nueva área. Al final del proceso muestra la sección transformada con la posición del centroide, como se puede ver en la **Figura 10-4**. Nótese la diferencia en la posición del centroide, los momentos de Inercia y el área final.

Figura 10-4: Perfil C con refuerzo transformado a perfil con solo elementos planos. Izquierda, representado con Modelo de línea Media sin doblez; Derecha, representado con Modelo de línea Media con doblez. Fte. Autor.



Al final del proceso, el usuario puede exportar la información en tres matrices que incluyen:

1. Matriz de elementos que incluyen número de elementos, la longitud, orientación en grados respecto al anterior, espesor de cada uno, el módulo de elasticidad y el esfuerzo de fluencia.
2. Matriz de la sección ajustada que incluye, el área ajustada, momentos de Inercia y posición del centroide.

- Matriz de coordenadas, que incluye las coordenadas de inicio y fin de cada elemento. Esta matriz permite al usuario alimentar la herramienta Excel (ver 10.2) para realizar la estimación de la carga.

La vista general de la herramienta se muestra en la **Figura 10-5**.

Figura 10-5: Pantalla general de la herramienta. Fte. Autor.

DISEÑO DE PERFILES ROLADOS REFORZADOS CON BARRAS

Perfil C Reforzado-PCR | Línea Media sin Doble

Entrada y controles

a: 10 | Long apoyo: 9.20
b: 73 | refuerzo
c: 0 | ☐ Prueba perfil
d: 0
e: 0 | E perfil: 200000
f: 42.5 | E refuerzo: 200000
g: 0 | Fy perfil: 250
t: 1.5 | Fy refuerzo: 420
dr: 9.5
r: 3

Propiedades

Panels (un)	Valores
Area(mm ²)	518.0886
Ixx(mm ⁴)	7.2325e+05
Iyy(mm ⁴)	3.0806e+05
xCG(mm)	32.5000
yCG(mm)	-51.8639

Sección Calculada

Comparación

Previsualizar
Calcular
Comparar
Exportar
Salir

Rutina que genera las propiedades geometricas de una sección de lamina delgada reforzada por 2 barras, adaptadas a un perfil compuesto unicamente por paneles rectos.
Desarrollada en: Curso Dirigido I-2015 Maestría Ing. Mecánica por Javier Urbano Toile
Prof. Ing. Ricardo Parra -Universidad Nacional de Colombia-

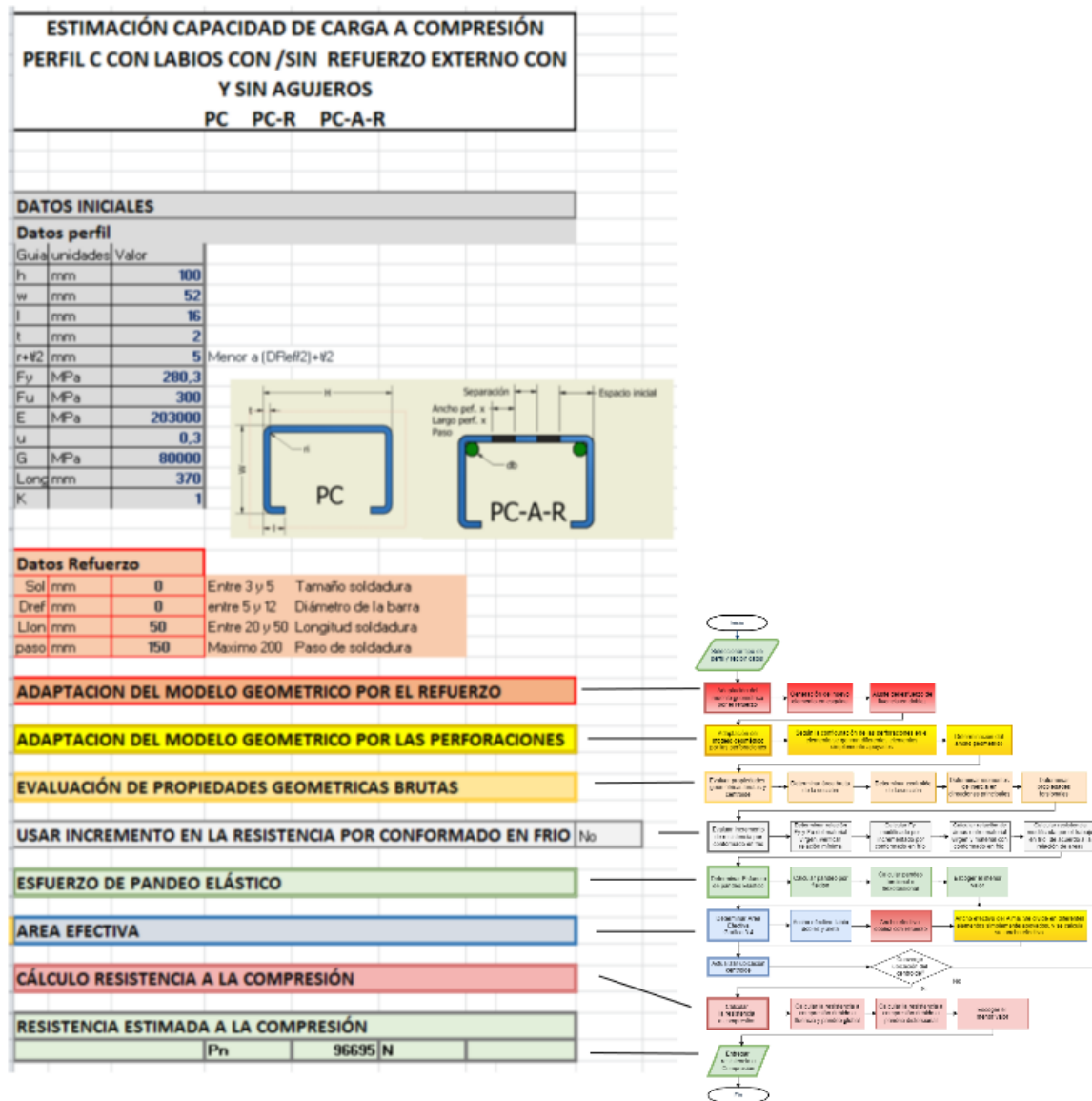
Para validar los cálculos obtenidos, se reprodujeron las mismas condiciones en otros softwares (Inventor, SolidWorks, CUSFM) que manejan el cálculo de propiedades de geométricas obteniendo, resultados con diferencias menores al 0.8%.

10.2 EXCEL

10.2.1 Hoja de cálculo para estimar la capacidad de carga en perfiles tipo C con labios, con y sin refuerzo con barras, con y sin agujeros.

De acuerdo con la sección 4.3 y el procedimiento planteado en dicha sección (ver Figura 4.7) se desarrolló una hoja de cálculo que permite realizar el cálculo de la estimación de carga para un perfil en C. En la **Figura 10-6** se muestra la pantalla principal de la herramienta. Internamente la herramienta ejecuta para una sección de perfil en C, con o sin refuerzo, con y sin agujeros, los cálculos desde la adaptación geométrica hasta la estimación de carga.

Figura 10-6: Pantalla general de la hoja de Cálculo y correlación con el esquema propuesto. Fte. Autor.

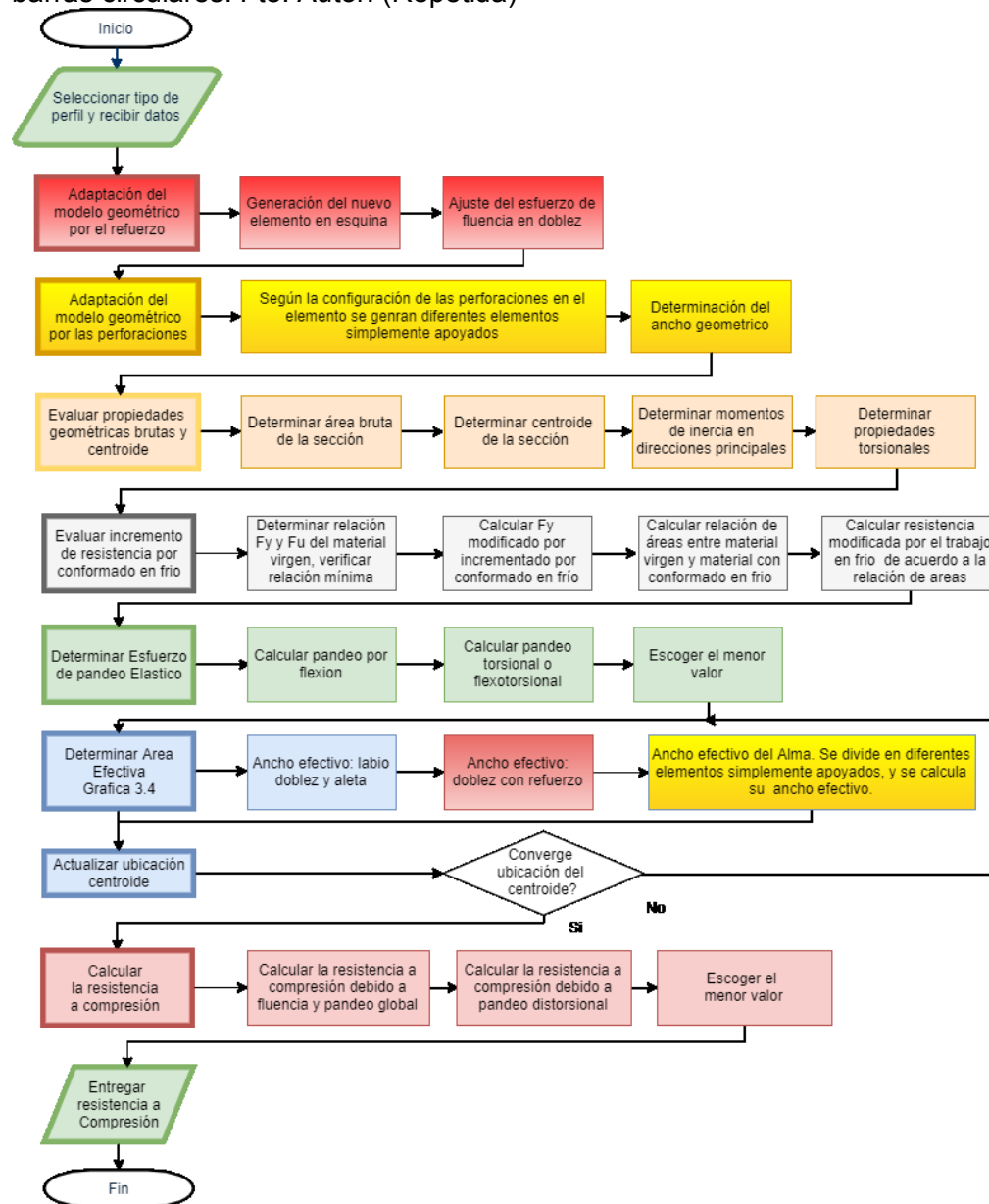


En la **Figura 10-6** aparece colapsado todo el proceso que se describe paso a paso a continuación (aparecen resaltados en el color de acuerdo con el proceso). La Hoja de cálculo inicia realizando la colección de **DATOS INICIALES**: geométricos y materiales del perfil, geométricos y materiales del **REFUERZO** si es el caso, geométricos de las **PERFORACIONES** en el alma, de acuerdo a la **Figura 4-4**, y la **Figura 10-8**. Luego se solicitan datos relacionados con la configuración global del perfil, longitud y tipo de apoyo.

Siguiendo el proceso se realizan las **Adaptaciones geométricas por el refuerzo**, generando los nuevos elementos esquina y el ajuste del esfuerzo de fluencia en la zona del doblez (ver 3.5). Las adaptaciones geométricas debido al refuerzo también pueden ser extraídas de la herramienta de Matlab Desarrollada, ver 10.1. Luego de acuerdo con la

presencia o no de perforaciones, se realiza las **Adaptaciones geométricas por las perforaciones** del tipo elemento y sus condiciones de apoyo en la zona del alma (ver 2.6.3).

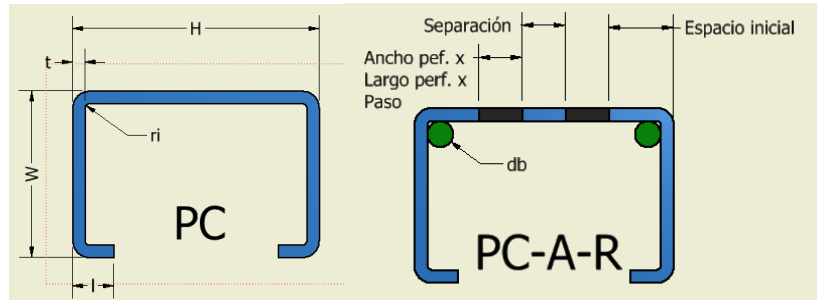
Figura 10-7: Procedimiento para cálculo de una sección con agujeros y con refuerzo de barras circulares. Fte. Autor. (Repetida)



Una vez se han realizado las adaptaciones geométricas, la hoja de cálculo realiza la **Evaluación de las propiedades geométricas brutas**: área bruta, centroide, momentos de inercia y propiedades torsionales. Y si lo decide hacer el usuario, **Evalúa el incremento de resistencia por el conformado en frío**. Posteriormente se hace uso de las ecuaciones de la normativa para determinar el **Esfuerzo de pandeo elástico**, calculando el esfuerzo

de pandeo elástico por flexión, por torsión y por flexotorsión y escogiendo el menor de estos valores.

Figura 10-8: Sección en C Nomenclatura en la Hoja de Cálculo. Fte. Autor.



Luego se **Determina el área efectiva** comenzando por la parte más alejada del alma, en este caso el labio, luego la aleta, la equina modificada y finalmente el alma. Con esta área efectiva se recalcula el centroide y se valida respecto al anterior cálculo. Se valida la convergencia y con esta área efectiva se continua con el proceso. El proceso detallado se muestra en la **Figura 2-24**.

Posterior a esto, teniendo en cuenta las condiciones de apoyo y la longitud del perfil se calcula la **Resistencia a la Compresión**, escogiendo el menor valor entre la resistencia a compresión debido a fluencia y pandeo global. También se verifica la resistencia a debido al pandeo distorsional se escoge el menor y este es el resultado, la Estimación de la **Resistencia a Compresión de un perfil con refuerzo y agujeros**.

10.2.2 Hoja de Cálculo para Estimar la capacidad De carga en perfiles tipo L con labios, con y sin refuerzo con barras.

El esquema de operación de la hoja de cálculo para perfiles tipo L, tiene similar secuencia de desarrollo. Se obvia en este caso el ajuste geométrico por los agujeros pues el objetivo de esta validación con perfil tipo L es el de comparar los perfiles en L reforzados y sin reforzar.

En la **Figura 10-6** aparece colapsado todo el proceso que se describe paso a paso a continuación (*aparecen resaltados en el color de acuerdo con el proceso*). La Hoja de cálculo inicia realizando la colección de **DATOS INICIALES**: geométricos y materiales del perfil, geométricos y materiales del **REFUERZO** si es el caso, Luego se solicitan datos relacionados con la configuración global del perfil, longitud y tipo de apoyo. Prosiguen la **Adaptaciones geométricas por el refuerzo**, generando los nuevos elementos esquina y el ajuste del esfuerzo de fluencia en la zona del dobléz (ver 3.5). Una vez se han realizado las adaptaciones geométricas, la hoja de cálculo realiza la **Evaluación de las propiedades geométricas brutas**: área bruta, centroide, momentos de inercia y propiedades torsionales. Y si lo decide hacer el usuario, **Evalúa el incremento de resistencia por el conformado en frío**. Posteriormente se hace uso de las ecuaciones de

la normativa para determinar el **Esfuerzo de pandeo elástico**, calculando el esfuerzo de pandeo elástico por flexión, por torsión y por flexotorsión y escogiendo el menor de estos valores.

Figura 10-9: Pantalla general de la hoja de Cálculo para perfil L Fte. Autor.

ESTIMACIÓN CAPACIDAD DE CARGA A COMPRESIÓN		
ANGULO CON LABIOS CON REFUERZO		
PL y PL-R		
DATOS INICIALES		
Datos perfil		
Gui	unidad	Valor
h	mm	70
w	mm	70
l	mm	15
t	mm	1,2
r+t/2	mm	4,2
Fy	MPa	580
Fu	MPa	610
E	MPa	205000
u		0,3
G	MPa	80000
Lon	mm	3000
K		0,5
Menor a (DRef/2)+t/2		
Datos Refuerzo		
Sol	mm	3
Dref	mm	6
Llon	mm	50
Paso	mm	150
Entre 3 y 5	Tamaño soldadura	entre 5 y 12
entre 5 y 12	Diámetro de la barra	Entre 20 y 51
Entre 20 y 51	Longitud soldadura	Maximo 200
Maximo 200	Paso de soldadura	
ADAPTACION DEL MODELO GEOMETRICO POR EL REFUERZO		
A	ybarra	A'ybarra
Iam curv	7,316832	1,5246
Iam rect	2,88	0
Iam rect	2,88	0
Sold lej	1,5	6,2
Sold cer	1,5	1,6
Ref	28,2744	3,6
A total	44,95123	125,5578
Y barra Esquina	2,7932	mm
Proy lat	5,5864	mm
Longitud	7,900366	mm
Espesor	5,68977	mm
EVALUACIÓN DE PROPIEDADES GEOMETRICAS BRUTAS		
USAR INCREMENTO EN LA RESISTENCIA POR CONFORM No		
ESFUERZO DE PANDEO ELÁSTICO		
AREA EFECTIVA		
CÁLCULO RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN		
RESISTENCIA ESTIMADA A LA COMPRESIÓN		
Pn	6511	N

Luego se **Determina el área efectiva** comenzando por la parte más alejada del alma, en este caso el labio, luego la aleta, la equina modificada y finalmente el alma. Con esta área efectiva se recalcula el centroide y se valida respecto al anterior cálculo. Se valida la convergencia y con esta área efectiva se continua con el proceso. El proceso detallado se muestra en la **Figura 2-24**.

Posterior a esto, teniendo en cuenta las condiciones de apoyo y la longitud del perfil se calcula la **Resistencia a la Compresión**, escogiendo el menor valor entre la resistencia a compresión debido a fluencia y pandeo global. También se verifica la resistencia a debido

al pandeo distorsional se escoge el menor y este es el resultado, la Estimación de la **Resistencia a Compresión de un perfil con refuerzo y agujeros.**